

KIRIKKALE ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNE ANABİLİM DALI  
YÜKSEK LİSANS TEZİ

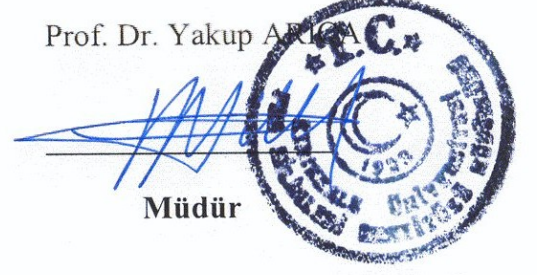
ALTERNATİF YAKITLARIN BENZİNLİ MOTOR PERFORMANSI ÜZERİNE  
ETKİSİNİN İNCELENMESİ

KADİR GÜNDOĞAN

TEMMUZ 2005

Fen Bilimleri Enstitü Müdürünün onayı.

Prof. Dr. Yakup ARIKA



Müdür

Bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak **Makine** Anabilim Dalı standartlarına uygun olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. Veli ÇELİK

Anabilim Dalı Başkanı

Bu tezi okuduğumuzu ve Yüksek Lisans tezi olarak bütün gerekliliklerini yerine getirdiğini onaylarız.

Prof. Dr. Veli ÇELİK

Danışman

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Veli ÇELİK

Doç. Dr. İbrahim UZUN

Yrd. Doç. Dr. Hüsnü DİRİKOLU

## ÖZET

### ALTERNATİF YAKITLARIN BENZİNLİ MOTOR PERFORMANSI ÜZERİNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ

GÜNDOĞAN, Kadir

Kırıkkale Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makina Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi

Danışman : Prof. Dr. Veli ÇELİK

Temmuz 2005, 89 sayfa

Ulaşım sektörü için alternatif yakıtlar aramanın başlıca nedenleri; süratle azalmakta olan petrol rezervleri, sınırlı sayıdaki petrol üreticilerine bağımlılığın azaltılması, ticari kaygılar ve çevrenin korunması şeklinde özetlenebilir. Sınırlı olan petrol kaynaklarının yakın gelecekte bu ihtiyacı karşılayamayacağı tahmin edilmektedir. Ayrıca motorlar, şehirlerdeki hava kirliliğinin de en önemli kaynağıdır. Taşıt motorlarının verimlerinin yükseltilmesi, egzoz emisyonlarının azaltılması ve motorlar için uygun özelliklere sahip alternatif motor yakıtlarının bulunması ve geliştirilmesi, motorlarla ilgili araştırmaların temel konularını oluşturmaktadır.

Buji ateşlemeli motorlarda kullanılabilecek alternatif yakıtlar; sentetik yakıtlar, alkoller ve gaz yakıtlar olarak sınıflandırılmaktadır. Çeşitli alternatif

yakıtların benzinli motorlarda kullanılması ile ilgili bir çok çalışma yapılmıştır. Bunların büyük çoğunluğu deneysel çalışmalar olup, sadece bir alternatif yakıt için gerçekleştirilmiştir. Farklı alternatif yakıtların motorlarda yaratacağı etkileri gerçekçi bir şekilde karşılaştırmak için; benzer özelliklerdeki özelliklerde ki motorlarda çeşitli çalışma koşullarında her bir yakıt için motor çevrimini ve motor performansını incelemek gerekir.

Bu çalışmada, öncelikle benzinli motorlarda kullanılmaya uygun alternatif yakıtların genel özellikleri verilmiştir. İkinci olarak alternatif yakıtların benzinli motorlarda kullanılabilmesi için gerekli ekipmanlar ve sistem dönüşümlerinin tanımı yapılarak, motor için gerekli olan modifikasyonlar detaylı olarak tanıtılmıştır. Daha sonra benzinli motorlarda değişik çalışma koşullarında her bir alternatif yakıt için elde edilmiş sonuçların, motor performansına olan etkileri karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Alternatif yakıt, LPG, CNG, Hidrojen, Yakıt pili, Araç Performansı,

## ABSTRACT

### A STUDY ABOUT THE EFFECTS OF USE OF ALTERNATIVE FUELS TO VEHICLE PERFORMANCE

GÜNDOĞAN, Kadir

Kırıkkale University

Graduate School Of Natural and Applied Sciences

Department of Machine, M. Sc. Thesis

Supervisor : Prof. Veli ÇELİK

July 2005, 89 pages

Transportation industry is seeking for alternative fuels mainly because of ever decreasing world oil reserves, commercial concerns, to reduce their dependence to the limited number of oil producers, and to be more nature friendly. It is a well-known fact that limited oil reserves will not be enough for the need in the near future. Moreover one of the main causes of air pollution in the cities is a vehicle engine. As a result of these today, increasing the efficiency, reducing exhaust emissions, and finding alternative fuels make the main subjects that are being researched among the industry.

Alternative fuels that can be used in the plug-ignited engines are classified as alternative fuels, synthetic fuels alcohols, and oil based fuels (gas). There have been

a lot of researches about the use of different alternative fuels in gas engines. Most of these researches are experimental and they are all about only one alternative fuel. In order to realistically examine the effects of different alternative fuels in different engines, it is essential to test similar engines' performances with changing revolutions for each fuel.

This research, first of all, gives the general specifications of different alternative fuels that can be used in gas engines. Secondly, the equipments and modifications that are needed to make the conversions of ordinary gas engines to alternative fuel ones are introduced. Later the results from engines for each fuel under different working conditions are discussed and the effects to engines' performances are compared.

**Key Words:** Alternative fuels, LPG, CNG, Hydrogen, Fuel cell, Vehicle Performance

## TEŞEKKÜR

Tezimin hazırlanması esnasında her türlü yardımını esirgemeyen ve biz genç araştırmacılara büyük destek olan, bilimsel, akademik ve idari tüm birikimlerini sonuna kadar bizlerin hizmetine veren, tez yöneticisi hocam, Sayın Prof. Dr. Veli ÇELİK'e, tez çalışmalarım esnasında her konuda daima yardımını gördüğüm hocam Sayın Doç. Dr. İbrahim UZUN'a, büyük fedakarlıklarla bana destek olan arkadaşım Bülent Serdar ULUSOY'a, teşekkür ederim.

Son olarak, hayatımın her aşamasında her türlü destek ve yardımlarını esirgemeyerek her türlü fedakarlığı göstererek şu anda bulunduğum aşamaya gelmemi sağlayan ve yoğun ilgilerini hiçbir zaman eksiltmeyen, başta babam olmak üzere bütün aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

## SİMGE VE KISALTMALAR DİZİNİ

### SİMGELER

$\lambda$	:	Hava fazlalık katsayısı
<b>k</b>	:	Yay katsayısı
<b>l</b>	:	Moment kolu uzaklığı
<b>Md</b>	:	Döndürme momenti
<b>P</b>	:	Momente karşı gelen kuvvet
<b>S</b>	:	Geri döndürme kuvveti
<b>W</b>	:	Dengeleme ağırlığı
<b>x</b>	:	Yay uzaması

### KISALTMALAR

<b>CNG</b>	:	Sıkıştırılmış doğalgaz
<b>EGR</b>	:	Egzoz gazları resirkülasyonu
<b>HFk</b>	:	Hava fazlalık katsayısı
<b>LNG</b>	:	Sıvılaştırılmış doğalgaz
<b>LPG</b>	:	Sıvılaştırılmış petrol gazı
<b>RPM</b>	:	Dakikadaki devir sayısı



## ŞEKİLLER DİZİNİ

### ŞEKİL

1.1. Dünya enerji tüketimi .....	4
2.1. Propan ve Bütan İçin Basınç ve Sıcaklığa Bağlı Olarak Denge Durumu .....	9
2.2. Bir motor için en önemli benzin ve LPG karaktersitiklerinin karşılaştırması	10
2. 3. Birinci nesil LPG dönüşüm sisteminin şematik gösterimi .....	12
2. 4. İkinci nesil LPG dönüşüm sisteminin şematik gösterimi .....	13
2. 5. Üçüncü nesil LPG dönüşüm sisteminin şematik gösterimi .....	14
2. 6. LPG deposu montaj resmi .....	17
2. 7. Multivalfin LPG deposuna montajı ve ön görünüşü .....	18
2. 8. Yakıt seçme anahtarı.....	21
2.9. LPG selonoid valfi kesit görünümü .....	22
2.10. Benzin selonoid valfi görünümü .....	23
2.11. LPG buharlaştırıcı elemanının görünümü .....	24
2.12. Set üstü karıştırıcının şematik görünüşü ve monte edilmiş şekli .....	26
2.13. Plaka altı karıştırıcının şematik görünüşü ve monte edilmiş şekli .....	26
2.14. Karışık sistem karıştırıcının şematik görünüşü ve monte edilmiş şekli .....	27
2.15. Çatallı sistem karıştırıcının şematik görünüşü ve monte edilmiş şekli .....	28
2.16. Doğalgaz sıkıştırma prosesi .....	31
2.17. Dolum ucu .....	38
2.18. Selenoidli dolum ucu .....	39
2.19. Harici dolum ucu .....	39

<b>2.20.</b> Tank valfi .....	40
<b>2.21.</b> Koruyucu kapak .....	41
<b>2.22.</b> Vent borular .....	41
<b>2.23.</b> Çelik boru .....	42
<b>2.24.</b> Regülatör .....	43
<b>2.25.</b> Karbüratörlü araçta CNG tesisatı .....	45
<b>2.26.</b> Şematik yakıt pili .....	58
<b>2.27.</b> Yakıt pili birimleri (THREE BOND) .....	59
<b>3.1.</b> Bir motor ve elektrik dinamometresinin bağlanması .....	67
<b>3.2.</b> Bir elektrik dinamometresi ve yükleme dirençlerinin şematik resmi .....	67
<b>3.3.</b> Motora Etki Eden Kuvvetler .....	68
<b>3.4.</b> Bir su freninin motora bağlanması .....	70
<b>3.5.</b> Bir su freninin ve dinamometrenin şematik resmi .....	70
<b>3.6.</b> LPG-Benzin kullanımında moment ve devir sayısı değişimi .....	75
<b>3.7.</b> LPG-Benzin kullanımında efektif güç ve devir sayısı değişimi .....	76
<b>3.8.</b> LPG-Benzin kullanımında efektif verimi ve devir sayısı değişimi .....	77
<b>3.9.</b> LPG-Benzin kullanımında Özgül yakıt tüketimi ve devir sayısı değişimi .....	78
<b>3.10.</b> Benzin ve CNG ile çalışmada motor momenti ve motor devri ilişkisi .....	80
<b>3.11.</b> Benzin ve CNG ile çalışmada motor gücü ve motor devri ilişkisi .....	81
<b>3.12.</b> Benzin ve CNG ile çalışmada özgül yakıt tüketimi ve motor devri ilişkisi ...	81
<b>3.13.</b> Benzin ve CNG ile çalışmada özgül enerji tüketimi ve motor devri ilişkisi ...	82

## ÇİZELGELER DİZİNİ

### ÇİZELGE

2.1. Propanın ve bütanın fiziksel ve kimyasal özellikleri .....	8
2.2. Değişik propan/bütan oranlarına göre LPG' nin gösterdiği özelliklerin değişimi.....	11
2.3. Ham Petrol, Benzin, Motorin ve Doğal Gazın Bazı özellikleri .....	34
2.4. Doğal Gazın Kimyasal Bileşimi (Mol Yüzdesi olarak) .....	35
2.5. Çeşitli yakıtların fiziksel ve kimyasal özellikleri .....	47
3.1. Çeşitli motor yakıtlarının karşılaştırılması .....	72

## İÇİNDEKİLER

ÖZET .....	i
ABSTRACT .....	iii
TEŞEKKÜR .....	v
SİMGELER DİZİNİ .....	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	ix
İÇİNDEKİLER .....	x
1. GİRİŞ .....	1
2. MATERYAL VE YÖNTEM .....	6
2.1. Benzinli Motorlarda LPG Kullanımı.....	6
2.1.1. LPG'nin Fiziksel Ve Kimyasal Özellikleri ve Karakteristikleri.....	7
2.1.2. Lpg Dönüşüm Sistemleri ve Elemanlarının Tanıtımı.....	11
2.2. Benzinli Motorlarda Doğalgaz Kullanımı.....	29
2.2.1. CNG .....	30
2.2.2. CNG Dolum İstasyonu Ekipmanları.....	31
2.2.3. Doğal Gazın Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri .....	32
2.2.4. Doğal gazın depolanması ve emniyeti .....	36
2.2.5. Doğalgaz dönüşümünde kullanılan malzemeler .....	38
2.3. Hidrojenin Benzinli Motorlarda Kullanımı .....	45
2.3.1. Hidrojenin Fiziksel, Kimyasal Özellikleri ve Depolanması .....	45

2.3.2. Hidrojenin Üretimi .....	51
2.3.3. Benzinli Motorlarda Hidrojen Kullanımı .....	51
2.3.3.1. Harici karışım hazırlama yöntemi .....	52
2.3.3.2. Dahili karışım hazırlama yöntemi .....	54
2.3.3.3. Hidrojen Yakıt Pili Motorlar .....	56
2.3.3.4. Yakıt pili çalışma prensibi .....	57
3. ARAŞTIRMA BULGULARI VE SONUÇLAR .....	61
3.1. Motor Performans Değerlerinin Ölçümü .....	61
3.2. Alternatif Yakıtların Performans Değerlerine Etkileri .....	71
3.2.1. Benzin ve LPG Kullanılan Motorlarda Performans Karşılaştırması	71
3.2.2 Benzin ve CNG Kullanılan Motorlarda Performans Karşılaştırması	79
4. SONUÇ.....	83
KAYNAKLAR .....	87

## 1. GİRİŞ

Mevcut enerji kaynaklarının tükenmekte oluşu motorlu taşıtlarda kullanılmak üzere alternatif enerji kaynaklarının arayışını son yıllarda artırmış bulunmaktadır. Yüz yılı aşkın süredir Otto ve Diesel ilkelerine göre çalışan motorlarda ana yakıt olarak petrol kökenli yakıtlar kullanılmaktadır. Ancak 1970 'li yıllarda yaşanan petrol krizi nedeniyle içten yanmalı motorlarda alternatif yakıt kullanımı düşünülmeye başlanmıştır. Mevcut petrol rezervlerinin 40 yıllık ömrünün kalmış olması da alternatif yakıt çalışmaları için önemli bir neden olmuştur.

İçten yanmalı motorlarda halen kullanılmakta olan benzin ve motorin petrolün rafine edilmesi sonucu üretilmektedir. Doğada mevcut enerji kaynaklarından kolayca elde edilebilmesi, depolama ve taşıma bakımından da herhangi bir sorun oluşturmaması nedeniyle, yüzyılı aşan bir süredir hem Otto, hem de Dizel ilkelerine göre çalışan motorların ana yakıtı petrol esaslı yakıtlar olmuştur. Ancak 1970li yıllarda başlayan enerji krizi nedeniyle, içten yanmalı motorlar için alternatif yakıt arayışları başlamıştır. Ayrıca son yıllarda artan taşıt sayısı ile birlikte hava kirliliğini azaltmak amacıyla daha az kirletici emisyon çıkaran yeni yakıtlar üzerinde araştırmalar sürmektedir<sup>(1)</sup>.

Petrol krizi ile birlikte, ilk yıllarda alkollerin benzine alternatif olarak kullanımı ön plana çıkmıştır. Özellikle yüksek oktan sayısı nedeniyle, alkol benzin motorları için uygun bir yakıt olarak kabul edilmiştir. Ancak alkollerin sahip olduğu düşük enerji yoğunluğunun kullanım ve depolama açısından getirdiği bazı sorunlara ilaveten uygulamada karşılaşılan diğer sorunlar nedeniyle motor yakıtı olarak alkollerin yaygın olarak kullanımı söz konusu olmamaktadır. Ayrıca üretim

kaynaklarının da sınırlı olması ve hava kirliliği sorununa kesin çözüm getirmemesi alkollerin geleceğin yakıtı olma olasılığını kısıtlamaktadır<sup>(2,3)</sup>.

Geleneksel yakıtların yerine kullanılan yakıtlara ise alternatif yakıtlar denilmektedir<sup>(3)</sup>. Motorlarda kullanılan alternatif yakıtlar ise şu şekilde sınıflandırılmaktadır:

- Sıvılaştırılmış petrol gazı (LPG),
- Sıvılaştırılmış doğalgaz (LNG),
- Sıkıştırılmış doğalgaz (CNG),
- Alkol içeren yakıtlar (Metanol (metil alkol), etanol (etil alkol) ve diğer alkollerin saf veya %70'den az olmayan karışımları),
- Hidrojen,
- Elektrik,
- Biyolojik maddelerden üretilen alkol olmayan yakıtlar: soya yağı, ayçiçek yağı, diğer bitkisel yağ esaslı yakıtlar.

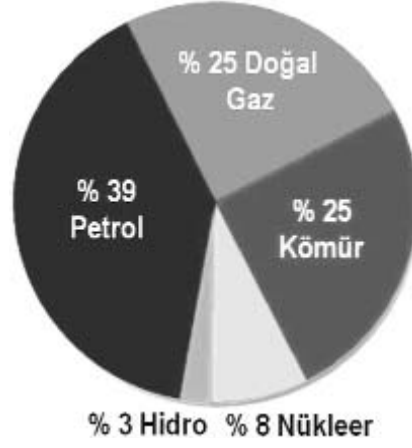
Benzin motorlu taşıtlarda alternatif yakıtlar, genelde yakıt maliyetlerinin düşürülmesi ve kirlenici egzoz gazları emisyonunun azaltılması amacıyla kullanılmaktadır. Ancak; kullanılacak olan alternatif yakıtın mevcut taşıt performansını olumsuz etkilememesi, taşıt üzerinde hacim ve ağırlık bakımından depolama sorunu oluşturmaması, gerekli emniyet koşullarını sağlaması, dönüşüm sistemi maliyetinin düşük olması da önem taşımaktadır. Kullanılacak alternatif yakıtın üretim kapasitesi ve maliyeti de ayrıca önem taşımaktadır. Bu bakımdan değerlendirildiğinde LPG'nin buji ateşlemeli motorlarda yakıt olarak kullanımında, benzin motorlarına göre bazı avantajlar sağlanmaktadır<sup>(4,5)</sup>.

Bu çalışma kapsamında incelenen alternatif yakıtlardan diğeri doğal gazdır. Doğal gazın büyük hacimsel yüzdesini metan (CH<sub>4</sub>) oluşturmaktadır. Benzin ve dizel motorları için çok uygun bir yakıt olan doğal gaz, fakir karışımlarda çalışma imkanı sağladığından yüksek verim sağlamakta ve daha az miktarda kirletici egzoz gazları ortaya çıkmaktadır. Ancak doğal gaz yeraltındaki rezervlere bağlı olması nedeniyle uzun vadede bir çözüm getirmemektedir. Bu nedenle uygulamasındaki kolaylıklar nedeniyle ancak geçiş dönemindeki yakıt olarak ele alınabilecektir.

Doğal gaz, bu kriterler bakımından olumlu ve motor yakıtı olarak kullanılabilir en önemli alternatif yakıtlardan birisidir. Bolluk, düşük maliyet ve temiz yanma karakteristikleri ve dağıtım sistemlerinin var oluşuna ek olarak daha düşük araç emisyonlarına imkan vermesi, doğal gazı son derece elverişli bir alternatif yakıt yapmaktadır <sup>(5,6)</sup>. Doğal gaz ve Metanol, enerji kaynağı olarak, gelecek 40 – 50 yıl için en cazip alternatif yakıtlar olarak görülmektedir. Güvenli olan ve temiz yanan doğal gaz, korozif de değildir. Yandığında formaldehit emisyonu da vermez <sup>(7)</sup>.

1991 yılı sonu itibarıyla, dünya doğal gaz rezervlerinin 125 trilyon m<sup>3</sup> kadar olduğu tespit edilmiştir. Ülkemizin toplam doğal gaz rezervi ise 34 milyar m<sup>3</sup> dolayındadır. Halen keşfedilmemiş gaz rezervleri de dikkate alınacak olursa, doğal gazın gelecekte petrolden daha zengin kaynaklara sahip bir enerji kaynağı olacağı söylenebilir. Günümüzde 7587,3 milyon ton petrol eşdeğeri olan dünya birincil enerji tüketimi içerisinde doğal gazın payı % 25 düzeyindedir. Diğer enerji kaynaklarının payları ise; petrol % 39, kömür % 25, nükleer % 8 ve hidro % 3 kadardır (Şekil 1.1). Doğal gaz yakıt olarak evlerde, iş yerlerinde, taşıtlarda, endüstride ve güç santrallerinde kullanılmakta, gelecek 20 yıl boyunca, doğal gaz tüketiminin % 50 kadar artması beklenmektedir.





Şekil 1.1. Dünya enerji tüketimi.

Buji ile ateşlemeli motorlar genellikle sadece doğal gaz veya herhangi bir zamanda, doğal gaz ve benzinden sadece bir tanesini kullanan çift yakıt sistemleriyle donatılmaktadırlar. Çift yakıtlı sistemlerde yakıt seçimi, sürücü tarafından kontrol edilen bir seçici anahtarla yapılmaktadır. Doğal gazı yakıt olarak kullanarak şehirlerdeki kirlilik düzeylerini azaltmak için, birçok ülke taşıtlarda kullanımını teşvik etmekte, doğal gaz projelerini desteklemektedir. Doğal gazın yakın gelecekteki kirlenme sorununa çözüm olmasının sebeplerinden biri de teknolojisinin olgunlaşmış olmasıdır. Halen dünyada, sıkıştırılmış doğal gazla çalışan ve çoğunluğu buji ile ateşlemeli olmak üzere, iki milyondan fazla taşıt bulunmaktadır<sup>(7)</sup>.

Yüksek kalitede bir enerji kaynağı olan LPG, çok geniş kullanım alanına sahiptir. Bunlar arasında inşaat, endüstri, tarım ve otomotiv alanları sayılabilir. Sıvı gazlar motorlar için en mükemmel yakıtlardır. Bu yüzden LPG çok iyi bir yakıt olarak düşünülebilir; vurunu direnci yüksektir, benzinle çalışan motorlara göre yaklaşık aynı gücü verir, ayrıca verimi daha iyidir ve daha temiz emisyonlar verir. Son olarak da içinde karbon depozitleri bulunmadığı için motor ömrünü uzatır.

LPG fiyatının benzine göre düşük düzeyde olması, mevcut taşıtların dönüşümünde ortaya çıkan dönüşüm maliyetlerine rağmen genelde bireysel açıdan ekonomik avantaj sağlamaktadır. Bu avantaj taşıtın yıllık kullanım miktarı ile orantılı olarak değişmektedir. Diğer taraftan LPG üretiminin kısıtlı olması, ülke genelinde taşıtlarda yakıt olarak kullanımının kısıtlandırılması amacıyla bazı önlemlerin alınmasını da gerektirmiştir. Bu amaçla çeşitli ülkelerde yakıt fiyatlarında ayarlama yapılmakta veya taşıt vergileri LPG kullanan taşıtlar için ayarlanmaktadır.

Bu çalışmada ayrıca, hidrojenin motor yakıtı olarak kullanılabilmesine ilişkin çeşitli araştırma ve derlemelere yer verilmiştir. Sudan elektroliz yoluyla üretilen hidrojenin yanması sonucu oluşan ana yanma ürünlerinden biri tekrar su olmaktadır. Böylece “yenilenebilir yakıt türü oluşturan hidrojen sonsuz kaynaklara sahiptir. Ayrıca fiziksel ve kimyasal özellikleri nedeniyle, karışım hazırlama yöntemine bağlı olarak belirli bir motordan, benzine göre daha yüksek güç alma olanağı sağlamaktadır. Ancak hidrojenin motorlarda yakıt olarak kullanımının sağlayacağı en önemli yararlarından biri hava kirliliği bakımından getirdiği üstünlüklerdir. Hidrojen yakıtında karbon bulunmaması nedeniyle, yanma ürünleri arasında CO, CO<sub>2</sub>, HC ve SO<sub>x</sub> gibi çevreyi kirletici bileşenler de bulunmayacaktır. Egzoz gazları arasında bulunan tek kirletici bileşen olan azotoksitler ise çeşitli yöntemlerle azaltılabilmektedir.

## 2. MATERYAL VE YÖNTEM

Son yirmi yıla bakıldığında alternatif yakıt arayışlarıyla ilgili yoğun çalışmalar göze çarpmaktadır. Alternatif yakıtlar ile ilgili çalışmalar, özellikle 1970'lerdeki petrol krizinden sonra yoğunluk kazanmıştır. Ayrıca dünya ham petrol kaynaklarının da sınırlı olması gerçeği bu çalışmaların hızlanmasındaki bir diğer önemli etkidir.

Petrole dayalı yakıtların yerini alacak yeni yakıtlar için zamanlama tam olarak belirlenememiştir. Konvansiyonel yakıtlardan alternatif yakıtlara geçiş oldukça zor gibi görünse de, bu çalışmada da yer verileceği gibi alternatif yakıtlardan özellikle LPG, CNG ve HİDROJEN' in benzinli motorlarda yakıt olarak kullanılması günümüzde oldukça yaygın hale gelmiştir.

Bu çalışmada, alternatif yakıt olarak kullanılabilen LPG, CNG, ve Hidrojen'in genel özellikleri, yakıt karakteristikleri, benzinli bir araçta alternatif yakıt olarak kullanılmak üzere yapılması gereken sistem değişiklikleri çalışmanın bu bölümünde irdelenmiştir.

### 2.1. Benzinli Motorlarda LPG Kullanımı

Ülkemizde en yaygın olarak kullanılan alternatif yakıt sıvılaştırılmış petrol gazı (LPG)dır. Dünyada ulaşım yakıtı olarak LPG 1930'lu yıllardan beri kullanılmaktadır. LPG ile çalışan motorlar çoğunlukla buji ateşlemeli (benzinli) motorlardır. Dizel motorlarında ise LPG dönüşümü daha komplekstir <sup>(8)</sup>. Ülkemizde

LPG kullanan taşıtlarda çoğunlukla satış sonrası LPG dönüşüm kitleri kullanılmaktadır.

### **2.1.1. LPG'nin Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri ve Karakteristikleri**

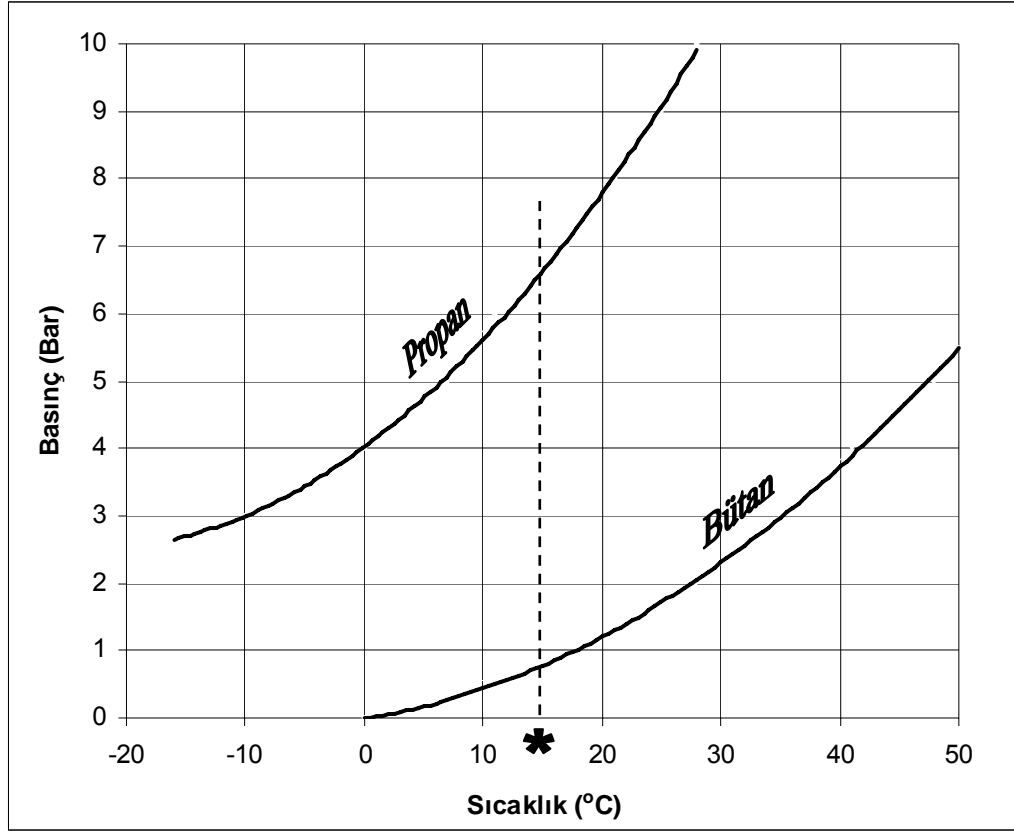
Sıvılaştırılmış petrol gazı (LPG) ham petrol veya türevlerinden elde edilen propanın ( $C_3H_8$ ) ve bütanın ( $C_4H_{10}$ ) belirli oranlardaki karışımından oluşmaktadır. LPG ayrıca doğal gazdan da elde edilmektedir. Propan ve bütanın fiziksel ve kimyasal özellikleri Çizelge 2.1'de verilmiştir.

LPG'nin en önemli özelliklerinden biri buhar basıncıdır. Bu basınç değerine bağlı olarak yakıt tankında bulunan yakıtın sıvı ve buhar fazları arasındaki denge durumu sağlanmaktadır. (Şekil 2.1). Örneğin bütan için buhar basıncı 0 °C sıcaklıkta 0.005 bar iken, propan için aynı sıcaklıkta 4 bar olmaktadır. 15 °C sıcaklıkta ise bütan için 0.8 bar, propan için ise 6.5 bar olur. Görüldüğü gibi karışımın bütan/propan oranına bağlı olarak LPG'nin buhar basıncı değişmektedir. Artan sıcaklıkla birlikte sıvı fazındaki propan ve bütanın hacmi hızla değişmekte ve basınç değerlerinde artış görülmektedir. Bu husus yakıt tanklarında emniyet açısından önem taşımaktadır.<sup>(9)</sup>

Propan ve bütan arasındaki diğer bir farklılık da kaynama noktasıdır. Kaynama noktası, atmosfer basıncı altında, gaz fazından buhar fazına geçiş sıcaklığını vermektedir. Propan - 43 °C sıcaklıkta sıvı fazında bulunurken, bütan 0 °C sıcaklıkta sıvı fazında bulunmaktadır. Bu nedenle özellikle soğuk iklim ortamlarında LPG bünyesindeki propan daha fazla tutularak sıvı fazından gaz fazına geçiş kolaylaştırılmaktadır.

**Çizelge 2.1.** Propanın ve bütanın fiziksel ve kimyasal özellikleri

<b>GAZ</b>	<b>PROPAN</b>	<b>BÜTAN</b>
<b>Kimyasal formülü</b>	<b>C<sub>3</sub>H<sub>8</sub></b>	<b>C<sub>4</sub>H<sub>10</sub></b>
<b>Moleküler ağırlığı</b>	44	58
<b>Özgül ağırlığı (kg/litre)</b>	0,51	0,58
<b>Kaynama noktası (°C)</b>	-43	-0,5
<b>Alt ısı değeri (kcal/kg)</b>	11070	10920
<b>Tutuşma noktası (°C)</b>	510	490
<b>Tutuşma sınırları (hacimsel %)</b>	2,1-9,5	1,5-8,5
<b>Yanma hızı (cm/s)</b>	32	32

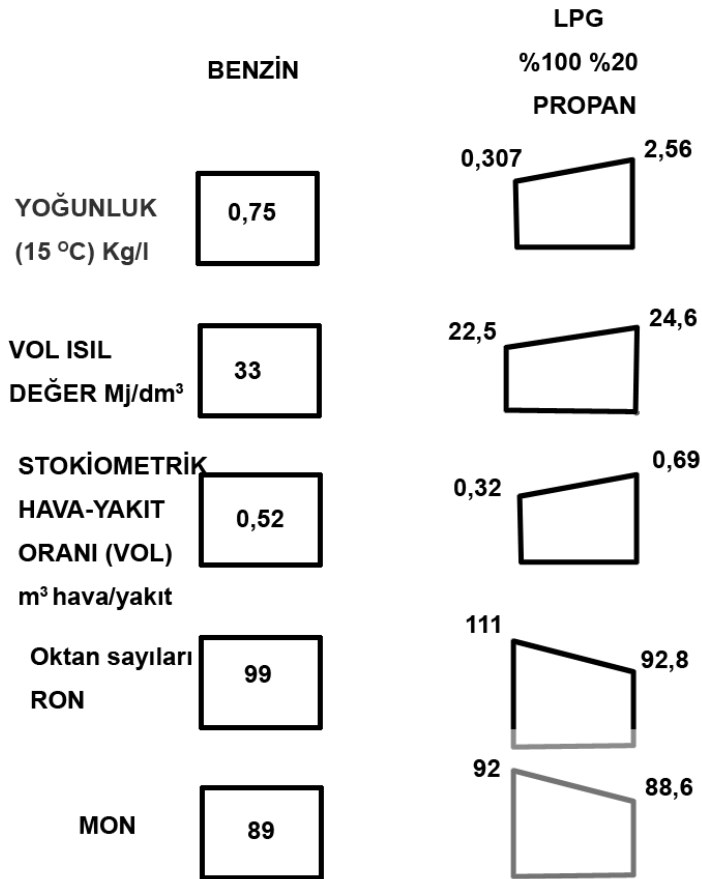


**Şekil 2.1.** Propan ve Bütan İçin Basınç ve Sıcaklığa Bağlı Olarak Denge Durumu

Propan ve bütanın bir diğer özelliği de yağ, boya gibi maddeleri eritmesidir. Ayrıca kauçuk hortumların da deforme olmasına neden olmaktadır. Bu nedenle LPG hortumları sentetik malzemeden yapılmaktadır. Yakıt tankı ile regülatör arasında yer alan basınç altındaki LPG hatları için ise özel bakır veya çelik boru kullanılmaktadır.

Normal benzin ile LPG arasında bazı farklılıklar vardır. LPG, motoru gaz olarak besleyen bir propan-bütan karışımıdır. Böylece optimal karışım hazırlanış, basitleşmekte bunun yanında emilen hava ile karışımı kolaylaşmaktadır. Normal sıvı yakıtların aksine LPG emme zamanı esnasında tamamen buharlaşır ve böylece daha büyükçe hacme yayılır. Ayrıca gizli buharlaşma ısısı motordaki termodinamik işlemi etkilemez. Bunun sebebi soğutma suyunun gaz karıştırıcıya girmeden önce

buharlaştırıcıyı ısıtmasıdır. Şekil 2.2’de motorla ilgili en önemli LPG karakteristiklerinin buna karşılık gelen benzin değerleri ile karşılaştırılması görülmektedir. LPG’nin bileşiminin bir bölgeden diğerine büyük ölçüde değiştiği için buna bağlı olarak karakteristiklerinin de değişeceği beklenmelidir. Örneğin, Avrupa’da ülkelere göre propan-bütan oranı %96 ila %20 arasında dalgalanmaktadır. Bu nedenle Şekil 2.2 ’deki değerlerin değişeceği aşıkardır. Çizelge 2.2 ’de çeşitli propan-bütan oranlarındaki değişim gösterilmektedir<sup>(10)</sup>.



**Şekil 2.2.** Bir motor için en önemli benzin ve LPG karakteristiklerinin karşılaştırması

**Çizelge 2.2.** Değişik propan/bütan oranlarına göre LPG' nin gösterdiği özelliklerin değişimi

<b>PROPAN/BÜTAN</b>	<b>%96 / % 4</b>	<b>%20 / % 20</b>	<b>DEĞİŞİM</b>
<b>Yoğunluk % 15 kg/lt</b>	0,507	0,56	% 10,4
<b>Hacimsel Isıl değer Mj/lt</b>	23,5	25,6	% 8,9
<b>Stokiyometrik Hava/Yakıt oranı</b>	6,12	6,69	% 9,3
<b>RON</b>	111	94	- 17
<b>MON</b>	97	90	- 7

Bileşimi meydana getirenlerin elde edilebilirliğine ve iklimik şartlara göre benzer değişimler diğer ülkelerde de gözlenebilir, propan verilen sıcaklıklarda daha yüksek basınçlar verebilir. Çizelge 2.2 'de piyasadaki değişik propan-bütan oranlarının ısı değerlerinde ve stokiyometrik hava yakıt oranlarında yaklaşık %9 civarında bir değişim ve oktan sayılarında 17'ye varan farklılık görülebilmektedir.

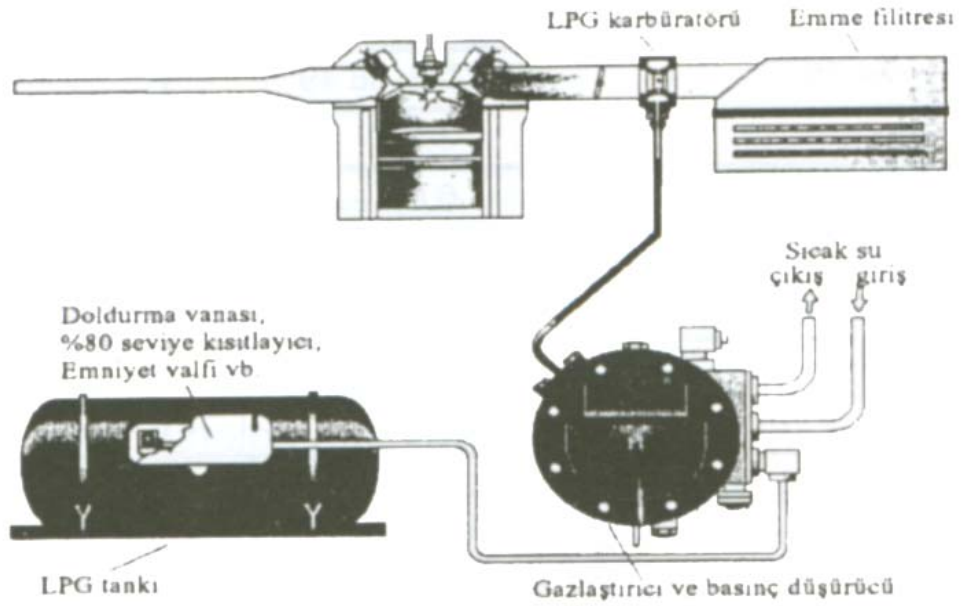
### **2.1.2. LPG Dönüşüm Sistemleri ve Elemanlarının Tanıtımı**

Benzinli motorların aynı zamanda LPG ile çalışmalarını sağlayacak dönüşüm sistemleri birinci, ikinci ve üçüncü nesil dönüşüm sistemleri olmak üzere üç grupta toplanmaktadır.



- **Birinci nesil LPG dönüşüm sistemleri**

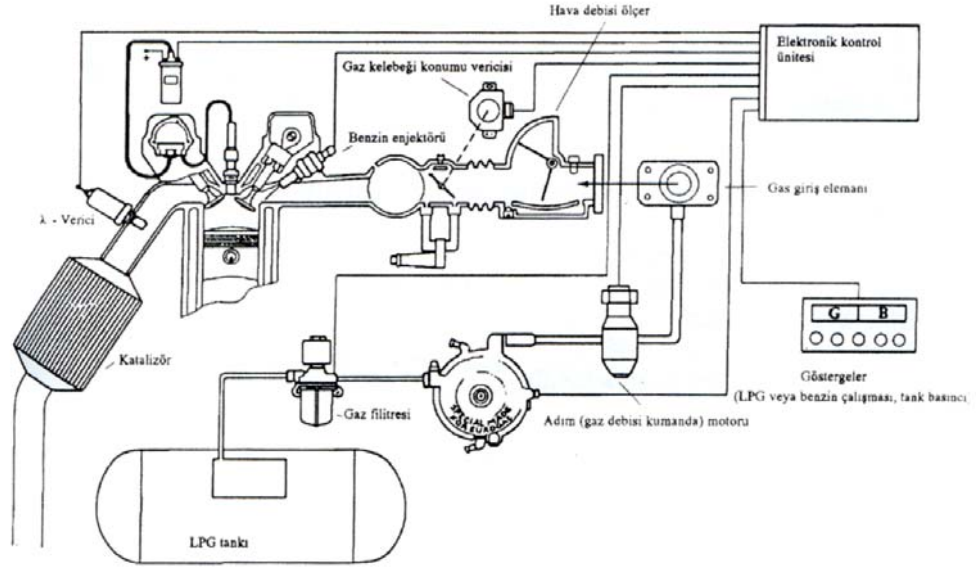
Birinci nesil LPG dönüşüm sistemleri en basit olan sistemlerdir. Bu sistemlerde açık devreli LPG donanımı kullanılmaktadır. Yakıt deposundan sıvı halde alınan yakıt, bir regülatör ve buharlaştırıcı yardımıyla emme manifoldunda yer alan karıştırıcıya gönderilerek hava ile karıştırıldıktan sonra silindirlere yollanmaktadır. Bu sistem karbüratörlü benzin motorlarının dönüşümünde kullanılmaktadır. Birinci nesil LPG sistemleri regülatörün diyaframı ayarlamak için aldığı sinyale göre vakumlu veya elektronik olarak ikiye ayrılır<sup>(11)</sup>.



**Şekil 2.3.** Birinci nesil LPG dönüşüm sisteminin şematik gösterimi

- İkinci nesil LPG dönüşüm sistemleri

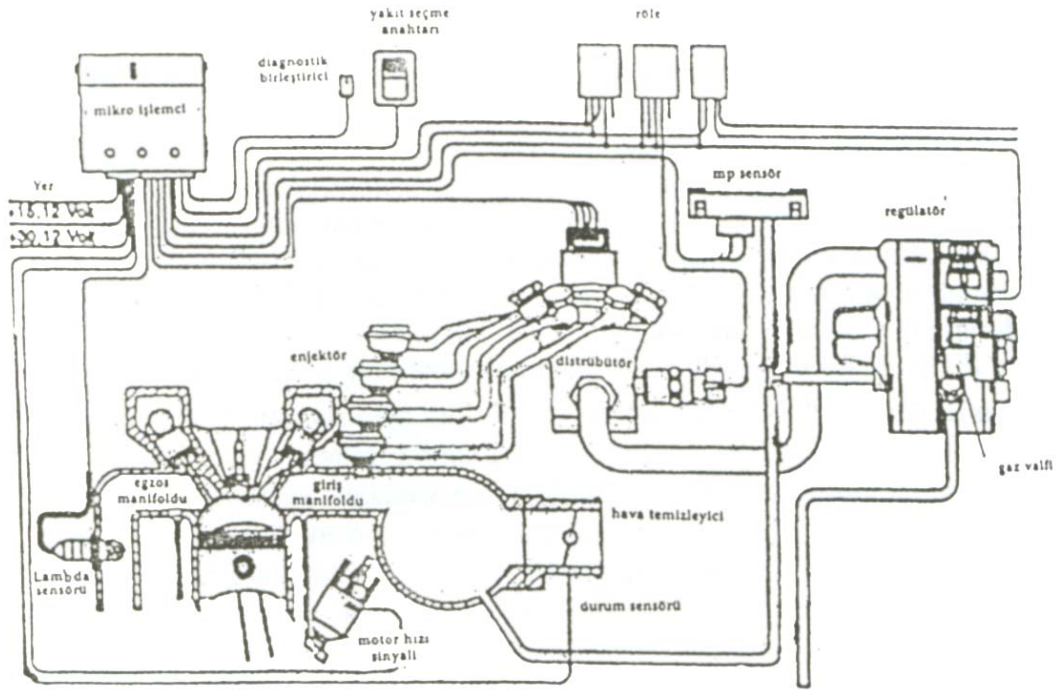
İkinci nesil LPG dönüşüm sistemleri kapalı devreli LPG donanımı kullanırlar. Kapalı devre sistemlerinde egzoz gazı içinde bulunan oksijen miktarı ölçülerek, elektronik kontrol ünitesi yardımıyla yakıt miktarı regülatörde uygun şekilde düzeltilmektedir. Böylece hava fazlalık katsayısı stokiyometrik değerde tutulabilmekte ve egzoz sisteminde katalitik konvertör yardımıyla düşürülen emisyon şartları sağlanabilmektedir. Orijinalinde yakıt enjeksiyon sistemi bulunan taşıtlara uygulanan bu dönüşüm sisteminde ek olarak bir lambda ( $\lambda$ ) sensörü, devir sayısı, gaz kelebeği konumu, motor sıcaklığı gibi motor parametreleri için sinyalleri değerlendiren bir elektronik kontrol ünitesi ve gaz debisini değiştiren debi ayar valfi bulunmaktadır<sup>(11)</sup>.



Şekil 2.4. İkinci nesil LPG dönüşüm sisteminin şematik gösterimi

- Üçüncü nesil LPG dönüşüm sistemleri

Üçüncü nesil LPG dönüşüm sistemleri yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu sistem çok noktadan benzin enjeksiyonu sistemine benzemektedir. Bu sistemde sıvı haldeki LPG emme supabı üzerine püskürtüldüğü için yakıtın büyük bir miktarı silindire sıvı halde girmektedir. Birinci ve ikinci nesil dönüşüm sistemleri uygulanmış araçlarda LPG 'nin gaz halde silindire girmesinden dolayı volümetrik verimdeki kayıplar neticesinde güçteki %2-5 oranındaki azalma üçüncü nesil LPG dönüşüm sistemlerinde (Şekil 2.5) görülmemektedir<sup>(11)</sup>.



Şekil 2.5. Üçüncü nesil LPG dönüşüm sisteminin şematik gösterimi

LPG kullanmak için kullanılan dönüşüm sisteminde bulunan ana elemanlar şunlardır<sup>(11, 12)</sup>:

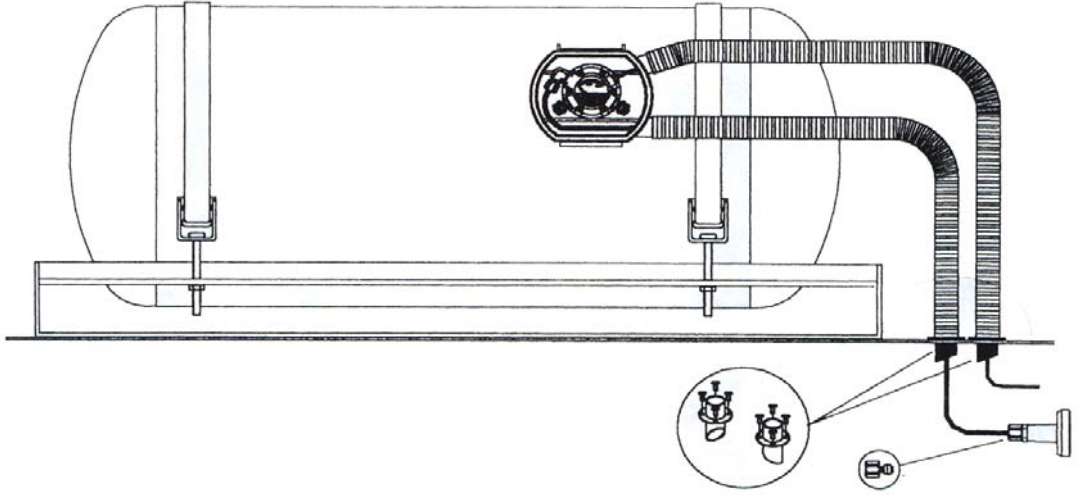
1. LPG deposu
2. Multivalf (Çokluvalf)
3. LPG - Benzin yakıt seçme anahtarı
4. LPG selenoid vanası
5. Benzin selenoid vanası
6. LPG buharlaştırıcı (regülatör, basınç düşürücü.)
7. Gaz Ayar Vanası
8. Karıştırıcı (Mikser)
9. İletim Elemanları

- **LPG deposu ve montajı**

LPG deposu maksimum 115 atmosfer basınca ve dış etkenlere mukavemetli yapılmış basınçlı kaptır. LPG tankları silindirik ve stepne tipinde olmak üzere iki çeşittir. Bunlar da kendi aralarında ikiye ayrılırlar: A tipi tanklar, B tipi tanklar. A tipi tanklar 17 atmosfer işletme basıncında çalışırlar. 30 atmosfer test basıncı ile test edilirler. B tipi tanklar 17 atmosfer işletme basıncında çalışırlar. 45 atmosfer test basıncı ile test edilirler. Depoların muayeneleri sırasında depolarda şişme, sızıntı, akma veya esneme belirtileri olmamalıdır. LPG depoları TS ve Avrupa standartlarına uygun olarak üretilmelidirler. Bütün üreticilerin depoları satılmadan önce 45 barlık bir basınca tabi tutulur. Her 100 depoluk üretim partisinden rastgele seçilen bir tanesi teste tabi tutulur. LPG tankları 10 yıldan fazla kullanılamaz ve 10 yılını dolduran depolar yenisi ile değiştirilmelidir. Eski depolar imha edilmelidir. LPG depoları taşıtlara uygun şekilde farklı uzunluk ve çapta üretilmektedirler<sup>(11, 12)</sup>.

LPG depoları, sıvı LPG ile %100 oranında doldurulmaması gereklidir. Depoda az miktarda LPG içerdiğinde bile iç basınç LPG karışımının buhar basıncına eşittir. Her durumda, basınç değerleri deponun mukavemeti ile karşılaştırıldığında çok küçüktür. Depo tamamen sıvı LPG ile doldurulduğunda basınç çok yüksek değerlere ulaşabilir. Deponun sıvı LPG ile doldurulması sırasında depo kapasitesinin %80'im aşmaması gerekmektedir. Depo üzerinde bulunan multivalf depo kapasitesi %80'i geçtiğinde dolumu kesmelidir. Her zaman depo içinde %20 genleşme payı kalmalıdır. <sup>(11)</sup>.

LPG deposu, binek araçlarda bagaja yerleştirilirler. Depolar kolayca sökülemeyecek şekilde montajı yapılmalıdır. Montajda dikkat edilmesi gereken önemli bir nokta ise multivalfin tank üzerine monte edilmesidir. Multivalf üzerindeki göstergenin ve diğer elemanların yatay konuma paralel olması sağlandıktan sonra, depo kayışı gerdirilerek sabitlenir. Yatay konumda monte edilmeyen bir tank multivalf üzerinde bulunan gaz emme borusundan gazı ya hiç emmez ya da emme borusu tankın dibine vuracağından LPG içinde bulunabilecek yabancı maddelerin emilmesine neden olabilir <sup>(11)</sup>.

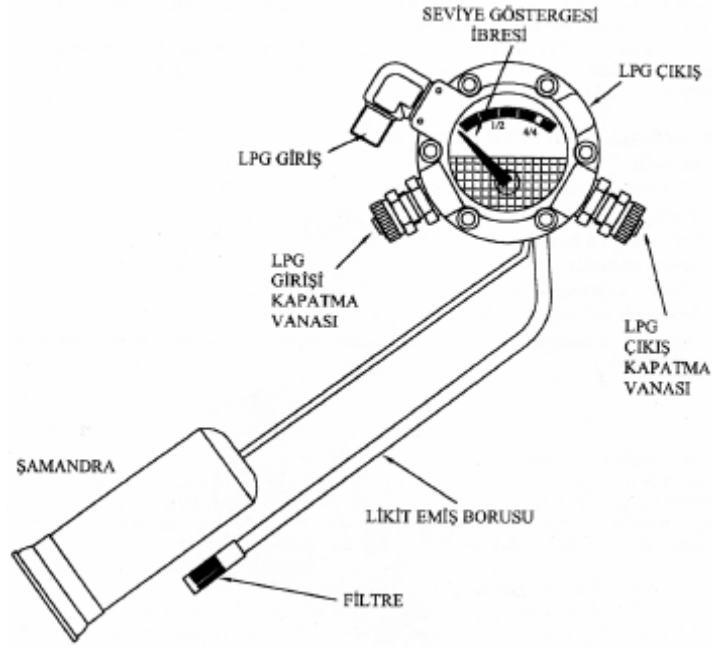


**Şekil 2. 6.** LPG deposu montaj resmi

- **Multivalf (Çoklu valf)**

Multivalf, LPG dönüşüm sisteminde yakıt deposu üzerine takılan, dolum yapma, yakıtın geri alınması ve seviye gösterimini sağlayan parçadır <sup>(12)</sup>.

LPG tankına gaz dolum işlemi, dolum limitini ayarlama, deponun seviyesini gösterme, LPG 'yi motora gönderme. aşırı akışı kontrol etme ve herhangi bir nedenden dolayı motora giden borular delinirse gaz akışını keserek emniyeti sağlamak multivalfin görevleridir.



Şekil 2. 7. Multivalfin LPG deposuna montajı ve ön görünüşü

Multivalflar kendi aralarında A tipi ve B tipi olmak üzere ikiye ayrılırlar: A tipi multivalflarda 25 atmosferik tahliye valfi bulunur, B tipi multivalflarda tahliye valfi bulunmaz.

**Doldurma:** Yakıt alma sırasında, yakıt pompasından geçen LPG multivalftan geçer. İyi bir multivalf, uzun bir dolun süresini engellemek için LPG 'nin geçişine fazla direnç göstermemelidir.

**Dolum Limiti:** Mevcut standartlar ve güvenlik nedenleriyle depo fazla doldurulmamalıdır. Maksimum dolum miktarı deponun %80 'dir kalan %20'lik bölümde sıcaklıktaki bir artışla birlikte içerideki sıvının bütün hacmi doldurmadan genişlemesine imkan sağlanır. Depoda gaz haldeki LPG için küçük de olsa bir hacim bırakıldığı sürece basıncın tehlikeli seviyelere yükselme olasılığı yoktur.

Doldurma işlemini doğru noktada kesebilmek için şamandıra, maksimum seviyeye ulaşıldığında LPG akışını kesen bir cihazla donatılmıştır.

**Seviye ölçer:** İki mıknatıs yardımıyla depodaki LPG seviyesini ölçmek mümkündür. Mıknatıslardan birisi tankın içinde olup, şamandıraya bağlı cihazlarla birleşiktir, diğeri ise deponun dışında olup göstergeye bağlıdır. Kadran genellikle dörde ayrılmıştır ve bir bölme de rezerv için mevcuttur. Deponun konumu yüzünden okumanın zor olacağı veya müşterinin arzu ettiği durumlarda multivalf uygun elektronik dönüştürücülere bağlanabilir. Bu dönüştürücüler, gerekli elektronik devrelere bağlanır ve yakıt seviyesini sürücüye uyarı ışıkları veya başka analog sistemlerle gösterirler.

**LPG Emme İşlemi:** Deponun çıkışına doğru dönük bir emme borusu sayesinde sıvı LPG 'nin depodan çekilmesini sağlar. Multivalf her durumda motorun ihtiyaç duyacağı LPG akışını yük kaybına neden olmadan sağlayabilmelidir.

**Kesme:** Multivalfin üzerinde emme ve doldurma borularını bloke etmeye yarayan iki vana vardır. Bunlar genel olarak açık durumdadır. Ancak bakım işlemi sırasında veya kaza vb. durumlarında kapatılabilir. Multivalfa erişim güç olduğunda, emme borusunu kolayca kapatabilmek için bir uzaktan kumanda sistemi monte edilmelidir.

**Aşırı Akım:** Multivalfin içinde ve LPG emme borusu üzerine yerleştirilen aşırı akım vanası belirli bir kalibrasyon değerinin üzerine çıktığında akışı durdurmaya yarar. Gerçekte aşırı akım vanası bir kaza sonucu motora giden LPG borusu kırılacak olursa gaz kaçaklarını durdurur.

Gaz seviyesini gösterebilmek için bir şamandırası birde gazın emilmesi için gaz emme borusu bulunmaktadır.



Multivalfin montajında en önemli hususlardan birisi de yatay konuma paralel olmasıdır. Multivalfin doğru olarak çalışabilmesi için, multivalfta bulunan çap ve ölçülendirmenin LPG deposu ile aynı olması gerekmektedir<sup>(11,12)</sup>.

- **LPG-Benzin yakıt seçme anahtarı**

Yakıt seçme anahtarı sürücü tarafından motorun benzinle veya LPG ile çalışmasını sağlayacak seçenekleri bulunan bir elektrik anahtarıdır<sup>(11,12)</sup>.

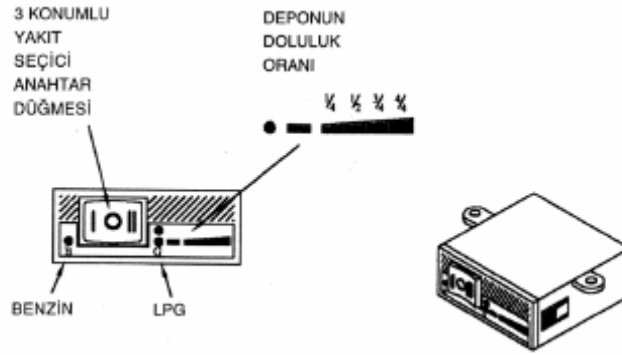
Aracın benzinden LPG 'ye. LPG 'den benzine geçişini sağlamak. LPG deposunda bulunan seviyeyi göstermek gerektiğinde benzin veya LPG selenoid valfinin kapalı konumda kalmasını sağlamak yakıt seçme anahtarının görevleridir.

Yakıt seçici anahtarların jikleli, yan elektronik ve tam elektronik olmak üzere üç çeşidi vardır. Bu tiplere ait devre şemaları kendi kit kutularının içinde bulunur.

Yakıt seçme anahtarında “Benzin-LPG-Bekleme” konumlarını içeren üç pozisyonlu anahtar ile bunların led lambaları ile LPG deposundaki yakıt seviyesini gösteren ışıklı göstergeye sahiptir. Bu elektronik anahtarın içerisinde yer alan bir devre, motorun ihtiyacı olan gaz miktarını ayarlamak üzere buharlaştırıcı (regülatör) üzerindeki elektro valfe (selenoid valfe) komut göndermeyi sağlamaktadır. Bu devre motor devrini aracın endüksiyon bobininden aldığı sinyale göre algılayıp elektro valfe komut göndermektedir.

Yakıt seçici anahtar benzin konumunda iken kırmızı led lambası yanmakta ve benzin selenoid valfi açık LPG selenoid valfi ise kapalı konumdadır. Yakıt seçici anahtar LPG konumunda iken göstergenin yeşil led lambası yanmakta ve LPG selenoid valfi açık benzin selenoid valfi kapalı konumdadır. Elektronik yakıt seçici anahtarda benzin ve LPG seçenekleri arasında bir bekleme konumu olup, benzinden

LPG 'ye geçerken kullanılmaktadır. Bekleme konumunda hem benzin hem de LPG selenoid valfleri kapalı konumdadır. Böylece her iki selenoid valf kapalı iken aracın karbüratöründeki benzinin tüketilmesi sağlanmakta ve motor durmak üzere iken anahtar sürücü tarafından LPG 'ye geçirilmekte ve aracın LPG ile çalışması sağlanmaktadır.



Şekil 2.8. Yakıt seçme anahtarı

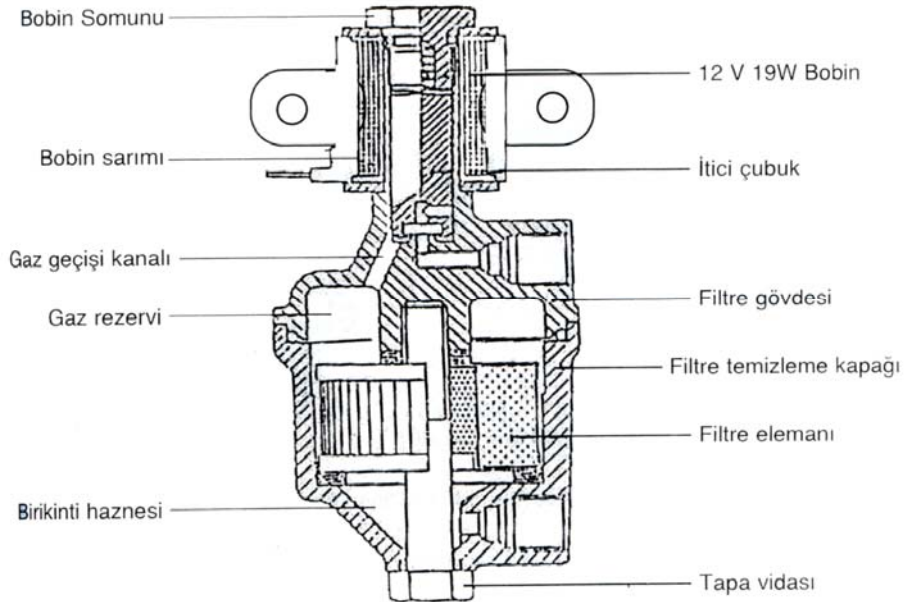
Elektronik yakıt seçici anahtarın bir diğer önemli görevi ise kontak anahtarı açıkken motor 5 saniye içinde çalışmazsa otomatik olarak LPG valflerini kapatır.

Anahtar üzerinde LPG deposundaki yakıt seviyesini gösteren 5 adet led lamba bulunmaktadır. Bunlardan bir tanesi kırmızı, diğerleri ise yeşil renktedir. Kırmızı led, rezervde yakıt kaldığını gösterir (yaklaşık 5 litre) yeşil ledler ise depodaki LPG miktarını 1/4 ve katları olarak gösterir<sup>(11,12)</sup>.

- **LPG selenoid valfi**

LPG deposu ve buharlaştırıcı arasına monte edilmiş elektromanyetik kumandalı bir valftir. Bu valfin görevi, motor çalışmadığı veya motor benzin ile çalıştırıldığında LPG akışını kesmektir<sup>(11)</sup>.

Sıvı halde depodan gelen LPG selenoid valfin ön haznesine (dekontasyon odasına) girer. Buradan sıvı LPG filtreden geçerek gaz rezervinin bulunduğu kısma geçer ve buradan gaz geçiş kanalı vasıtasıyla selenoidin valfin üst kısmına geçer. Aracın anahtarı kontakta olmadığı veya motor benzinle çalıştırıldığında bobinin aktivitesi durur ve valf çekiş yapamaz. Ayrıca itici çubuk (yay) aracılığı ile bastırılarak LPG 'nin buharlaştırıcıya doğru akışı keser.

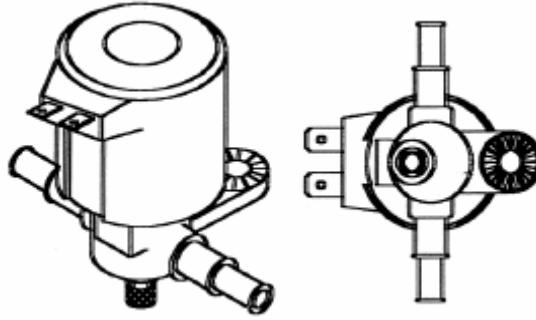


**Şekil 2.9.** LPG selenoid valfi kesit görünümü

LPG selenoid valfinin yük kaybı  $1 \text{ kg/cm}^2$ 'dir. Valf  $130 \text{ kg/saat}$  'lik geçirme kabiliyetine sahiptir. Çalışma ortamı sıcaklığı  $-29 \text{ }^\circ\text{C}$  ile  $+90 \text{ }^\circ\text{C}$  arasındadır. LPG selenoid valfi buharlaştırıcı üzerine monte edildiği gibi, buharlaştırıcıya en yakın noktadan aracın gövdesine monte edilir. Montajda valfin dik olarak monte edilmesine dikkat edilmelidir <sup>(11)</sup>.

- **Benzin selenoid valfi**

Benzin otomatığı ve karbüratör arasına monte edilen elektromanyetik valftir. Bu valfin görevi, LPG ile çalışmada karbüratöre benzin akışını kesmektir <sup>(11)</sup>.



**Şekil 2.10.** Benzin selenoid valfi görünümü

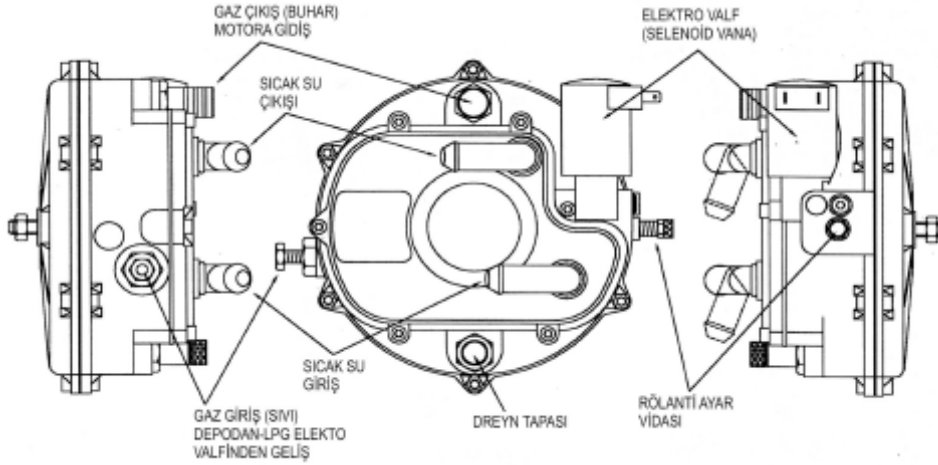
Benzin otomatığından gönderilen benzin selenoid valfine girer ve valften doğrudan geçer. Kontak anahtarı açık olmadığında veya yakıt seçme anahtarı LPG konumunda olduğunda yay ile itilen valf benzin akışını keser. Yakıt seçme anahtarı benzin konumuna getirildiğinde bobinin elektromanyetik alan oluşturur ve bu güç ile valfin açılması ve benzinin geçişi sağlanır. Benzin selenoid valfi yalnızca karbüratörlü motorlara monte edilir <sup>(12)</sup>.

- **LPG buharlaştırıcı (Regülatör)**

Buharlaştırıcı, yüksek basınçta gelen sıvı LPG 'yi motor soğutma suyunun sıcaklığını kullanarak gaz haline dönüştürür, motorun ihtiyacına göre LPG ayarlamasını yapar.

Elektronik ve pnömatik (vakumlu) olmak üzere iki çeşidi vardır. Elektronik tiplerde buharlaştırıcıdan karbüratöre gaz akışı kontak ile birlikte çalışır.

Buharlaştırıcı karbüratöre en yakın noktaya dikey pozisyonda monte edilir. Elektronik tiplerde buharlaştırıcı 12 Voltluk elektrikle çalışır. Bir kablo aracılığı ile yakıt seçme anahtarından komut alır.



**Şekil 2.11.** LPG buharlaştırıcı elemanının görünümü

- **Gaz ayar vanası**

Motorun 3500dev/dak ve üstünde olan devirlerde ihtiyacı olan LPG 'yi sağlamak için ayarlanabilen düz veya çatal bir ayardır. Buharlaştırıcı ile karıştırıcı

arasına monte edilir. Gaz ayar vanası motor yüksek devirlere getirilerek vana kapalı konumdan tam açık konuma doğru getirilirken motorun ihtiyacı olan gaz miktarına ulaşıldığında yana sabitlenir, böylece motora ideal gaz akışı sağlanmış olur <sup>(11)</sup>.

- **Karıştırıcı (Mikser)**

Karıştırıcı, LPG ve hava karışımını homojen bir şekilde sağlayan LPG dönüşüm sistemi parçasıdır. Karıştırıcının görevi çalışan motora, her çalışma durumunda emilen hava miktarı ile orantılı gaz vermeyi sağlamaktır <sup>(11)</sup>.

Karbüratörlü motorlarda en sağlıklı ve en verimli karıştırıcı montajı noktası karbüratörün en üst noktasıdır <sup>(11)</sup>.

Her motordaki farklı tipteki karbüratörler için farklı tipte karıştırıcılar vardır. Bunlar iki grupta toplanırlar.

- 1. Grup**

- a. Set üstü plaka karıştırıcılar

- b. Plaka altı karıştırıcılar

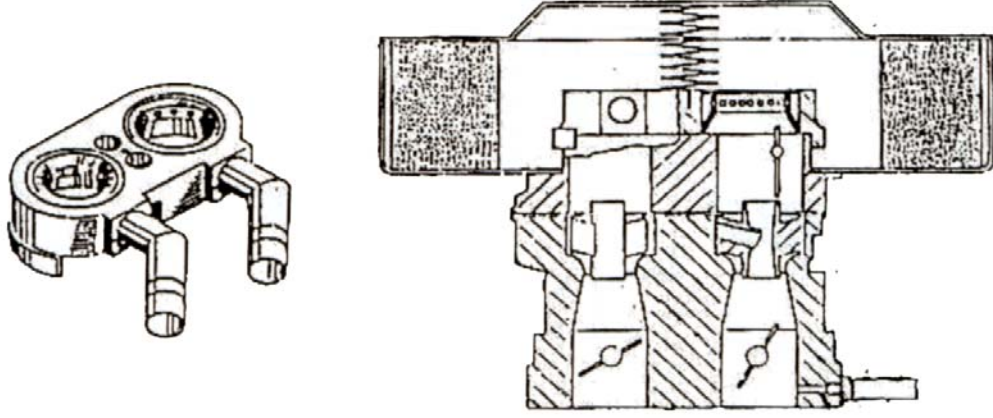
- 2. Grup**

- a. Karışık sistemler

- b. Çatallı sistemler

- **Set üstü karıştırıcılar**

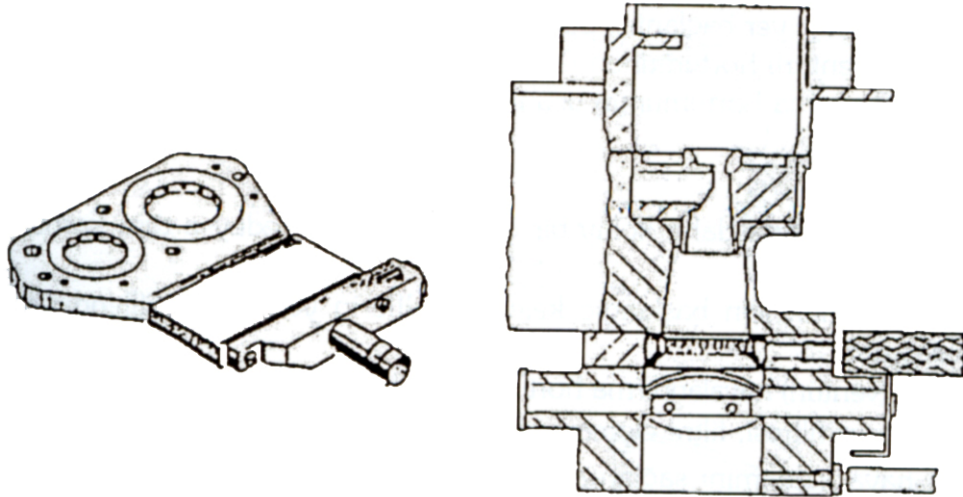
Bu tip karıştırıcılar karbüratörün üstünde bulunan karıştırıcılardır. Hava filtresi ile karbüratör arasına monte edilirler <sup>(11)</sup>.



Şekil 2.12. Set üstü karıştırıcının şematik görünüşü ve monte edilmiş şekli

▪ Plaka altı karıştırıcılar

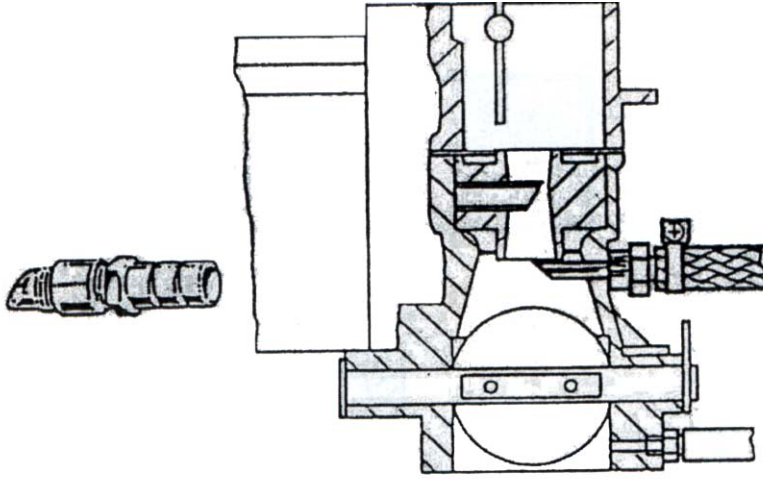
İki parçaya ayrılabilen karbüratörlerde gaz kelebeğinin üzerine monte edilirler. Bu tip karıştırıcılar hava-benzin karışımının daha iyi olmasını sağlarlar <sup>(11)</sup>.



Şekil 2.13. Plaka altı karıştırıcının şematik görünüşü ve monte edilmiş şekli

- **Karışık sistemler**

Bu tip karıştırıcı sistemler karbüratörü delen bir rekor olarak tarif edilebilir. Doğru uygulamalarda iyi sonuçlar verirler. Her tür karbüratör için uygun değildir. Montajında uzmanlık gerektirir, doğru monte edilemeyen karıştırıcılarla hem iyi sonuçlar alınamaz hem de karbüratör deforme edilmiş olur<sup>(11)</sup>.

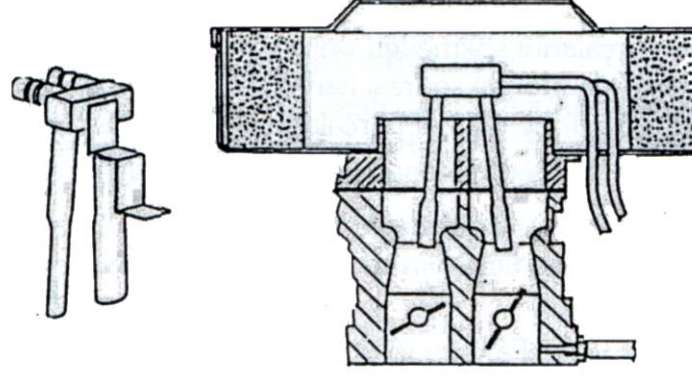


**Şekil 2.14.** Karışık sistem karıştırıcının şematik görünüşü ve monte edilmiş şekli

- **Çatallı sistemler**

Karışık sistemlere nazaran daha kolay bir çözümdür. Her türlü karbüratöre uygulanabilir. Karıştırıcı sisteminin çalışabilmesi için kelebek valflerinin başlangıç konumlarının yeniden ayarlanması gerekir: aksi halde sistem çalışmaz<sup>(11)</sup>.





Şekil 2.15. Çatallı sistem karıştırıcının şematik görünüşü ve monte edilmiş şekli

- **İletim Elemanları**

- **Bakır borular**

Bakır borunun görevi LPG deposundaki sıvı LPG 'yi LPG selenoid valfine oradan da buharlaştırıcıya iletmektir. Bakır boru mutlaka 45 bar basınca dayanıklı olmalıdır. Egzozdan en az 25 cm. uzaktan ve taşıtın altına yere sürtmesi sırasında zarar görmeyecek şekilde monte edilmesine dikkat edilmelidir.

- **Hortumlar**

Çelik zırlı örgülü hortum ve sıcağa ve basınca dayanıklı su hortumları olarak iki çeşittir.

Çelik zırlı örgülü hortum buharlaştırıcı ile karıştırıcı arasındaki LPG akışını sağlar. Bu hortum hidrokarbon geçirimlerine ve yağlı malzemelere karşı dayanıklı olmalıdır. 20–90°C sıcağa dayanıklı olmalıdır.

Sıcağa ve basınca dayanıklı su hortumunun görevi motor soğutma suyunu buharlaştırıcıya getirmek götürmektir. Kauçuk lastik malzemeden yapılmıştır. 20–90°C sıcağa ve en az 30 bar basınca dayanabilen mukavemette olmalıdır.

LPG dönüşüm kiti monte edildikten sonra sızdırmazlığa karşı dikkatli bir şekilde kontrol edilmelidir.

## **2.2. Benzinli Motorlarda Doğalgaz Kullanımı**

Mevcut olan bütün yakıt çeşitleri arasında en güvenilir, doğa dostu ve ekonomik yakıt türü doğalgazdır. Havadan daha hafiftir. Kompresörlerle basınçlandırılarak boru hatları marifetiyle uzun mesafelere taşınabilir. Sıvı halde taşınıp depolanabilmesi için -180 °C'ye soğutulması gerekmektedir.

Dünyadaki önemli doğalgaz kaynakları; Amerika, Sibiryaya, Orta Asya, Kanada ve kuzey denizlerinde bulunmaktadır.

Doğalgazın büyük bir bölümünü metan gazı oluşturmaktadır. Küçük bir kısmı etan ve parafin türü hidrokarbürlerdir. Başlıca Özellikleri:

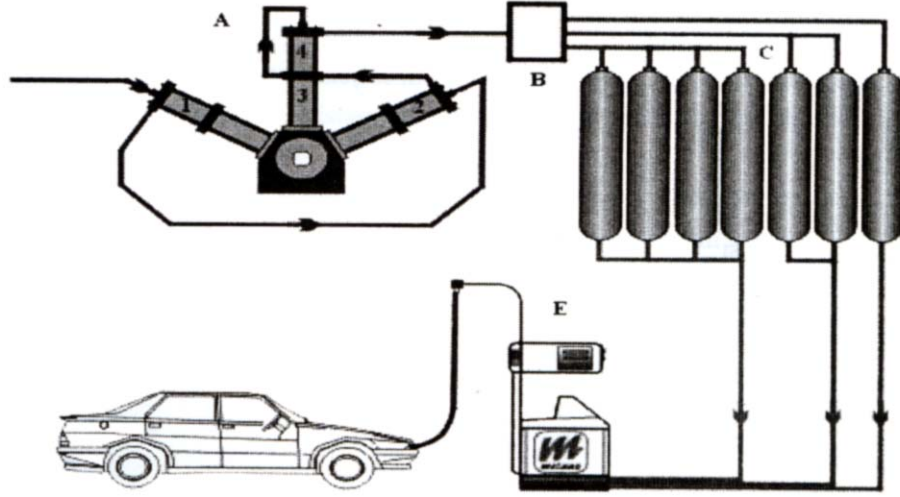
- Kimyasal sembolü : CH<sub>4</sub>
- Özgül Kütle: 0,7 172 Kg/m<sup>3</sup>
- Havaya Göre İzafi Yoğunluk: 0,5546
- Üst Kalorifik Değeri 9256 kcal/m<sup>3</sup>
- Alt kalorifik Değeri: 35,89 MJ/m<sup>3</sup>
- Alt Tutuşma Limiti : % 5
- Üst Tutuşma Limiti : % 15

Doğalgaz havadan daha hafiftir. Bir kaçak halinde LPG gibi zeminde birikmeyip havaya yükseldiği için daha güvenlidir. Ayrıca tutuşma riski en az olan yakıttır. Şehir içinde yoğun olarak çalışan toplu taşıma araçları dahil diğer bütün araçlarda kullanımı büyük faydalar sağlamaktadır. Bugün, çevre kirliliğine karşı daha duyarlı olan şehirlerde otobüs, taksi ve toplu taşıma araçlarında doğalgaz kullanımı teşvik edilmektedir.

### **2.2.1. CNG**

“Compressed Natural Gas” yani “Sıkıştırılmış Doğalgaz” diye adlandırılan CNG, doğalgazın yüksek basınçlarda sıkıştırılmış halidir. CNG’ nin araçlarda kullanımı doğalgazın 200-220 bara sıkıştırılarak depolama kapasitesini arttırmak suretiyle olmaktadır.

Doğalgaz dağıtım hattından alınan gaz, ki bunun basıncı 1 – 70 bar kadar olabilir. Kompresör ünitesi ile 200 bar basınca kadar sıkıştırılıp, her biri yaklaşık 15 m<sup>3</sup> kapasiteli olan CNG silindirlerinde depolanır. CNG dispenseri depodan aldığı gazı yine 200 bar basınçta aracın CNG deposuna basar. Bu proses Şekil 2.15’ de şematik olarak gösterilmektedir.



Şekil 2.16. Doğalgaz sıkıştırma prosesi

### 2.2.2. CNG Dolum İstasyonu Ekipmanları

- **Kompresör Ünitesi:**

Doğalgazın hattan alınıp 200 bar'a sıkıştırılmasını sağlayan ünedir. Sıkıştırma kompresör kapasitesine göre 2, 3 veya 4 kademede yapılmaktadır. Giriş basıncı aralığı ve kompresör kapasitesi çok geniş bir aralıkta olup (0,2bar - 70 bar), uygun kompresör seçiminde en etken parametrelerdir. Bir kompresör ünitesindeki etken parametreler şunlardır:

- Giriş Basıncı
- Çıkış Basıncı
- Çalışma Basıncı
- Sıkıştırma Kademeleri
- Kapasite (m<sup>3</sup>) (saatlik ve günlük)
- Elektrik tüketimi (kW)

- Hız (1/mm)
- Devir Sayısı (RPM)

- **Depolama Ünitesi:**

Kompresör Ünitesi ile birlikte veya ayrı bir modül şeklinde olabilir. Yeni sistemler genelde kompresör ve depolama ünitelerini tek bir modül halinde sunmaktadırlar. Kompresörün 200–250 bar basınca sıkıştırdığı gazı depoladığı ünite dir. Kapasitesine göre çeşitli sayılarda 50–125 lt. lik çelik silindirlerden oluşan bir modüldür. Mesela 125 lt. lik 10 adet silindir 1250 lt. su kapasiteli bir depolama ünitesini oluşturur.

- **Dispenser (Dolum Ekipmanı):**

Depolama Ünitesindeki gazı aracın CNG deposuna pompalamayı sağlayan ünite dir. Hızlı ve yavaş dolum opsiyonları vardır. Dispenserin en önemli parametreleri:

- Hızlı / Yavaş Dolum
- Pompa-hortum sayısı
- Mekanik / Elektronik
- Akış Debisi

### **2.2.3. Doğal Gazın Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri**

Doğal gaz teknik olarak üretilmeyen, doğal olarak tabiatta bulunan gazdır. Ana elemanı metan ( $\text{CH}_4$ ) olup inert gazlar ( $\text{N}_2$ ,  $\text{CO}_2$ ) dışında bünyesinde az miktarda yüksek parafinlerden etan ( $\text{C}_2\text{H}_6$ ), propan ( $\text{C}_3\text{H}_8$ ) ve bütan ( $\text{C}_4\text{H}_{10}$ ) bulunur. Doğal gazın sınıflandırılması değişik literatürlerde değişik şekillerde

verilmektedir. Anglo-Sakson literatüründeki sınıflamada doğal gaz içindeki azot ve metan yüzdeleri önem kazanırken, DIN 1340'da metan ile kükürt yüzdeleri göz önüne alınır.

- **Fiziksel Hali**

Doğal gaz normal şartlar altında gaz halindedir. Metanın kaynama noktası çok düşük (-164 °C) olması nedeniyle sıvılaştırılması oldukça zordur. Ancak kritik sıcaklıktan daha düşük sıcaklıklarda basınç altında sıvılaştırılabilir.

- **Yoğunluk**

Doğal gazın havaya göre yoğunluğu 0.58 ile 0.79 arasında değişir. Sıvılaştırılmış doğal gazın yoğunluğu ise 419 kg / m<sup>3</sup> tür.

- **Renk ve koku**

Doğal gaz renksiz ve kokusuz bir gazdır. Ayrıca yanarken duman çıkmaz.

- **Alev Sıcaklığı ve Yanma Hızı**

Doğal gaz, en önemli bileşeni metanın simetrik yapısı nedeniyle son derece kararlı bir gazdır. Doğal gaz oksijen alevi 2780 °C, doğal gaz-hava adyabatik sıcaklığı 1960 °C'dir. Doğal gazın yanma hızı 0.35 m/san'dir. Genel olarak, ham petrol, benzin, motorin ve doğal gazın bazı özelliklerinin karşılaştırılması Çizelge 2.1 'de görülmektedir.

**Çizelge 2.3** Ham Petrol, Benzin, Motorin ve Doğal Gazın Bazı özellikleri<sup>(13)</sup>.

<b>YAKIT ADI</b>	<b>ÖZGÜL AĞIRLIĞI</b>	<b>ÜST ISIL DEĞERİ</b>	<b>ALT ISIL DEĞERİ</b>	<b>OKTAN SAYISI</b>
	<b>(kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>(kJ/kg)</b>	<b>(kJ/kg)</b>	
<b>HAM PETROL</b>	0,75-1,00	41000-48000	38900-43550	67
<b>BENZİN</b>	0,72-0,78	46900	43100	91-97
<b>MOTORİN</b>	0,82-0,86	45200	42400	-
<b>DOĞALGAZ</b>	0,737	37800	34000	130

- **Kimyasal özellikleri ve bileşimi**

Doğal gaz, esas olarak metan, metana göre daha az oranda olmak üzere etan ve propan gibi hidrokarbonlardan ve azot, karbondioksit ‘hidrojen sülfür ile helyum gazlarından meydana gelmiş bir gaz karışımıdır. Çok küçük yüzdelerde olmak üzere oksijen ve argon gazlarının bulunduğu doğal gaz kaynaklarına da rastlanmaktadır. Çizelge 2.2’de doğal gazın kimyasal bileşenleri görülmektedir.

**Çizelge 2.4.** Doğal Gazın Kimyasal Bileşimi (Mol Yüzdesi olarak) <sup>(14)</sup>.

<b>BİLEŞENLER</b>	<b>MİKTAR</b>
<b>Metan</b>	Min % 85
<b>Etan</b>	Max % 7
<b>Propan</b>	Max % 3
<b>Bütan</b>	Max % 2
<b>Pentan ve öteki ağır hidrokarbonlar</b>	Max % 1
<b>Karbondioksit</b>	Max % 3
<b>Oksijen</b>	Max % 0.02
<b>Azot</b>	Max % 5
<b>Kükürt</b>	Max % 5.1 mg/m <sup>3</sup>
<b>Hidrojen sülfür</b>	Max % 5.1 mg/m <sup>3</sup>
<b>Merkaptan kükürt</b>	Max % 15,3 mg/m <sup>3</sup>
<b>Toplam kükürt</b>	Max % 25,5 mg/m <sup>3</sup>

- **C / H oranı (C: Karbon, H: Hidrojen)**

Yakıt içindeki C/H oranı yanma sonucu meydana gelen ürünlerin cinsine önemli derecede etki etmektedir. Doğal gazın yapısında C/H oranının benzine göre düşük olması yanma ürünleri arasında yanmamış hidrokarbonlar ile CO ve CO<sub>2</sub> nin daha az bulunmasına neden olmaktadır. Benzinde C/H oranı 5.295 kg C/kg H olmasına karşılık, propanda 4.468 kg C/kgH'dir <sup>(15)</sup>.



#### 2.2.4. Doğal gazın depolanması ve emniyeti

Doğal gaz taşıt üzerinde, yüksek basınç altında gaz şeklinde (CNG) depolandığı gibi, sıvı olarak (LNG) kryojenik tüplerde depolanabilmektedir. Gaz şeklinde depolama durumunda sıkıştırılmış doğal gazın maksimum basıncı 200 bar olup bazı yeni tanklarda bu basınç 240 bar seviyesine çıkmaktadır. Sıkıştırılmış tank içindeki volümetrik enerji, dizel yakıtın beşte biri, benzinin ise dörtte bir mertebesindedir. Dolayısıyla doğal gazın dizel yakıtı yerine kullanılması halinde beş kat daha fazla depo hacmi gerekmektedir.

Yakıtın kryojenik tanklarda depolanması için çok düşük sıcaklıklara ihtiyaç duyulduğundan doğal gazın gaz formunda sıkıştırılarak depolanması daha yaygın olarak kullanılan depolanma çeşididir.

Büyük hacim ihtiyacı depo ağırlıklarının da artmasına neden olmaktadır. Alüminyum alaşım tanklar, karbonlu çelikli ve çelik alaşımli tanklara göre daha hafif olmakta, en son geliştirilen komposit malzemeli tanklarda ağırlık daha da düşmektedir. En hafif doğal gaz tankının ağırlığı, dizel tankı ağırlığının iki misliden fazladır.

Depolamada ağırlık ve hacmin yanında bir diğer kriter de depolama basıncıdır. Basıncın 310.27 bar değerinin üzerine çıkması halinde, sistemin ağırlığının artmasına karşılık hacimde önemli azalma meydana gelmemektedir. Bu nedenle depolamada bu basıncın üzerine çıkılması uygun değildir. Basıncın 172.37 bar basınca göre ağırlığının % 4 artmasına karşılık hacimde % 10 'luk azalma görülmektedir.

Doğal gazın motor yakıtı olarak kullanılması halinde yakıt donanımında emniyet için bir çok tedbirin alınması gerekmektedir. Doğal gaz tüpleri, tüp valfleri,

bağlantı elemanları ve boruların standartlara uygunluğunun yanı sıra gerek malzemelerinin seçiminde, gerekse yapılması gereken emniyet testlerinde uyulması gereken kurallar, doğal gaz uygulamaları yapılan ülkelerde standartlar ile belirlenmiştir.

Doğal gaz tüpünün doldurma basıncının 200 bar olmasına karşılık tüpün yırtılma kontrolünün 900 bar basınçta yapılması öngörülmüştür. Doğal gazın su ihtiva etmesi halinde korozyon etkisi vardır. Su ile hidrokarbon karışımı, çeliğin korozyonuna neden olmaktadır. Bu nedenle yakıt içindeki su miktarının  $100 \text{ mg/m}^3$  değerinden az olması istenir. Korozyon hızı gaz içindeki  $\text{CO}_2$  miktarı ve gaz basıncı ile artmaktadır. Ayrıca doğal gaz-su kombinasyonu, belirti şartların oluşması halinde, katı kristal şeklinde hidrat oluşumuna neden olmaktadır. Bu nedenle doğal gazın bünyesindeki su miktarının  $30 \text{ mg/m}^3$  değerinin altında tutulması, bunun için dolum esnasında kurutma yapılması alınabilecek önlemler arasındadır.

Valflerin dışında kullanılan malzemelerden metal olanlarının, erime noktası  $500 \text{ }^\circ\text{C}$  in üzerinde olan alüminyum alaşımlarından seçilmesi, metal olmayan sentetik malzemelerin Hekzan veya Pentan içine daldırıldıktan sonra  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  de 72 saat süre içinde hacmini standartlar ile belirlenen sınır değerlerin üzerinde arttırmaması, oksijen ile temasta  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  da ve 20 bar basınçta 96 saat içinde aşınmaya uğramaması gibi şartları sağlaması istenmektedir.

Ayrıca doğal gaz sisteminde kullanılan çelik bağlantı elemanlarının bakır ile kaynaklı çift cidarlı yapılması, dişlerin sızdırmazlığı için conta ilave edilmesi ve sadece konik diş kullanılması gibi tedbirler alınmalıdır.

Valflerin metal olması ve sadece alet yardımı ile sökülebilir şekilde monte edilmesi, tüp bağlantılarının standartlara uygun ve özel amaçlara uyabilecek şekilde

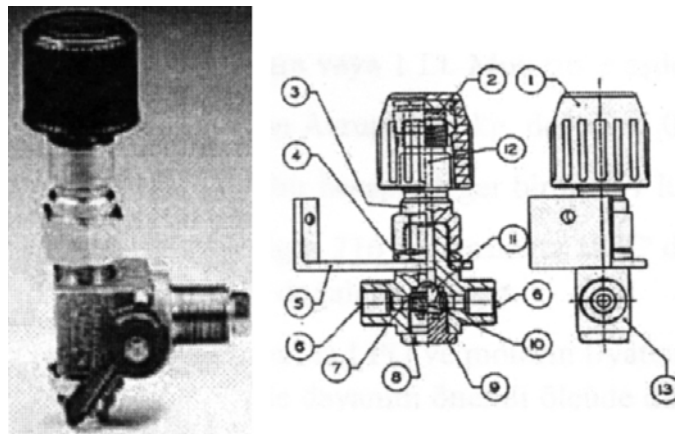
yapılması,tüp borularında geri akışı önleyecek valf bulunması ve bunun mümkün olduğu kadar tüp bağlantısına yakın yere monte edilmesi gerekmektedir.

Ateşlemenin yapılmaması halinde ve motorun çalışmaması durumunda,yakıt sevkinin önleyecek otomatik bir valfin sisteme ilavesi şarttır <sup>(15)</sup>.

### 2.2.5. Doğalgaz dönüşümünde kullanılan malzemeler:

- **Dolum ucu**

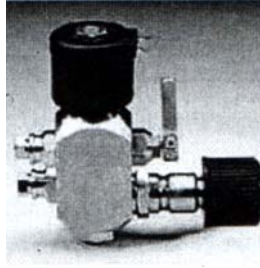
Motor bölümünde tank ve regülatör arasına yerleştirilmiş olan bu cihaz, dolum sistemi ve acil bir durum sırasında ya da bakım sırasında kullanılmak üzere manuel olarak çalışan küre şeklinde bir açma-kapama düğmesi ile bağlantıyı içermektedir. Sektörde uygulanmakta olan standartlara bağlı kalınarak kullanılabilen farklı dolum bağlantıları mevcuttur. Araç benzinle çalışırken ya da kontak kapalıyken regülatörün üzerinde yer alan yüksek basınç solenoid valfi doğalgazın akışını durdurur.



Şekil 2.17. Dolum ucu

- **Selenoidli dolum ucu (opsiyonel)**

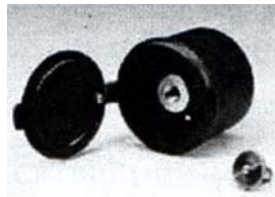
Motorun bulunduğu bölümde tank ve regülatör arasına yerleştirilmiş olan bu cihaz, dolum sırasında, araç benzinle çalışırken ya da kontak kapalıyken doğalgazın regülatöre girişini kesen gaz kesme selenoid valfi (besleme 12V, bobin güç kapasitesi 20W) ve İtalyan tipi dolum sistemi ile bağlantıyı içerir. Yüksek basınç gaz selenoid valfi olmayan regülatörle birlikte kullanılır.



**Şekil 2.18.** Selenoidli dolum ucu

- **Harici dolum ucu (opsiyonel)**

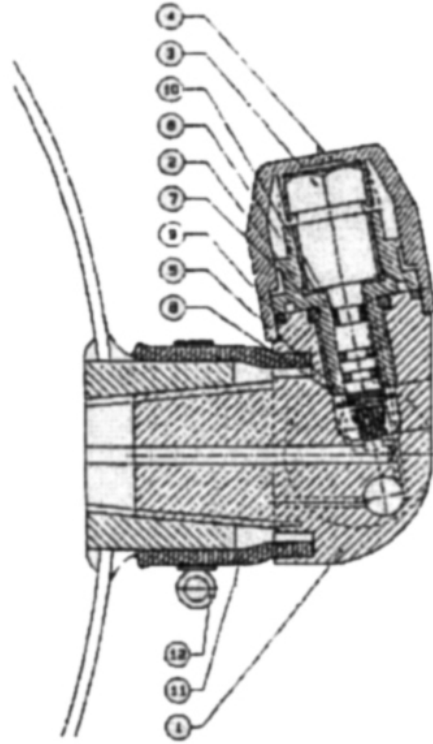
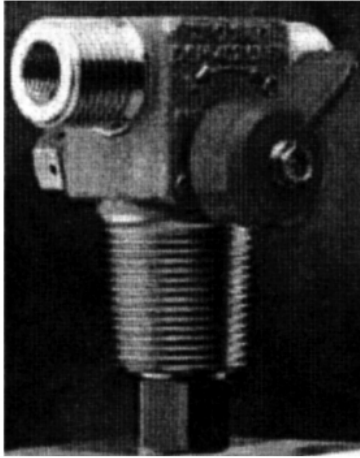
Harici dolum ucu, içeriye yerleştirilmiş bir kontrol valfi ve tüpün üzerinde bulunan ikinci bir kontrol valfi ile bağlantılıdır. Bu düzen kaportayı açmaya gerek kalmadan doğalgaz dolununun yapılabilmesini sağlar.



**Şekil 2.19.** Harici dolum ucu

- **Tank valfi**

Tankın üzerine bağlanan dolum sırasında doğalgazın girişini ve gazla çalışırken de regülatörden dışarı çıkışını sağlar. Bir acil durum sırasında ya da bakım sırasında kullanılmak üzere manuel olarak kullanılan bir sisteme sahiptir. Uygulanmakta olan yasalara bağlı kalınarak daha fazla güvenlik sağlayacak ilave ekipmanlardan (aşırı akım valfi gibi) gaz akışını kesen ,veya sınırlandıran dolum ucu veya belli bir ısıya ya da basınca ulaşınca gazın tanktan aracın dışına atılmasını sağlayan sistemler mevcuttur.



**Şekil 2.20.** Tank valfi

- **Koruyucu kapak**

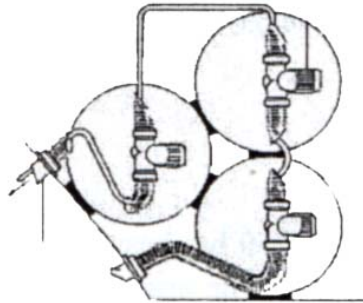
Güvenlik aracı olan bu koruyucu kapak tank valfini çevreler ve havalandırma hortumları ve delikleri yoluyla, oluşan herhangi bir gaz kaçağını aracın dışına tahliye eder. Alüminyum ve plastik olarak iki çeşidi mevcuttur.



**Şekil 2.21.** Koruyucu kapak

- **Vent borular**

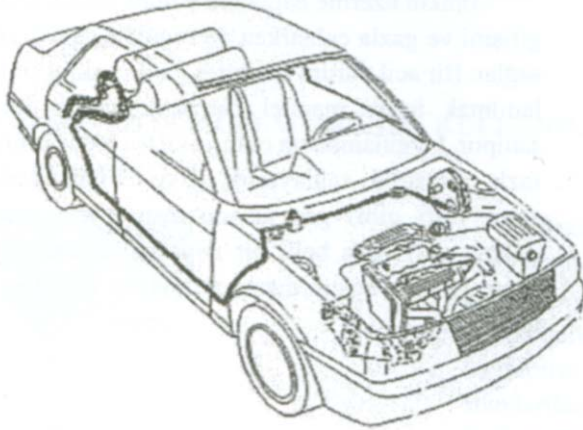
Koruyucu kapak valf bağlantılarından oluşabilecek gaz kaçağını hapsederken vent boruları bu kaçağın aracın dışına tahliye edilmesini sağlar. LPG tesisatında olduğu gibi montajı yapılmaktadır.



**Şekil 2.22.** Vent borular

- **Çelik boru**

Tanktan motor bölümüne doğalgazın getirilmesinde dikişsiz kalın etli çelik çekme boru veya çelik alaşımli benzer borular kullanılır. 300 bar basınca dayanması gerekmektedir ve mutlaka bir koruyucu plastik ile kaplanmalıdır. Kaynak veya eklemeli olmamalıdır. Kesinlikle yolcu bölümünden geçmemelidir. Isı kaynaklarından (ekzost gibi) 10 cm. uzakta olmalı ve her 80 cm.'de bir kelepçe ve vida marifeti ile kaportaya sabitlenmelidir.



**Şekil 2.23.** Çelik boru

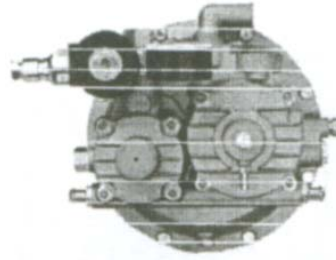
- **Regülatör**

Sistemin beynidir ve üç kademedden oluşmaktadır.

- Pnömatik (karbüratörlü araçlarda)
- Elektronik (karbüratör veya enjeksiyonlu araçlarda) ve
- Turbo (yüksek kapasiteli araçlarda) olarak üretilir.

Regülatörün ikinci ve üçüncü kademesi arasında bir elektro valf bulunmaktadır. Bu elektro valf motorun stop etmesi durumunda motora giden gaz akışını keser.

Birinci kademedede 5 Bara kadar bir basınç düşürme işlemi yapılmaktadır. Birinci kademe odacığına bir emniyet valfi eklenmiştir. 12 barı geçen basınçları atmosfere boşaltmaya yardımcı olmaktadır ve böylece regülatörü emniyet altına alır. Gaz çıkış basıncı motor gücüne göre ayarlanır. 70 kw'a kadar olan motorlar için gaz çıkış basıncı 0.9 bardır. 100 kw'a kadar olan motorlarda 1.4 bar ve bu gücün üstündeki motorlarda ise 1.8 bardır. Tercih edilirse regülatörün üzerine bir basınç manometresi de konulabilir. Üretici tarafından kaçak kontrolü yapılarak bir sertifika ile beraber satılmaktadır.



**Şekil 2.24.** Regülatör

- **Mikser**

LPG tesisatında olduğu gibi bir vakum yaratarak regülatörden gazın emilmesini kolaylaştırır. Ayrıca karışımın ayarlanmasına yardımcı olur.



- **Elektrik tesisatı**

Elektrik tesisatı aracın benzin veya doğalgaz ile çalışmasına yardımcı olur. Ayrıca enjeksiyonlu araçlarda değişik ürünler bir araya getirilerek aracın düzgün çalışmasını sağlar.

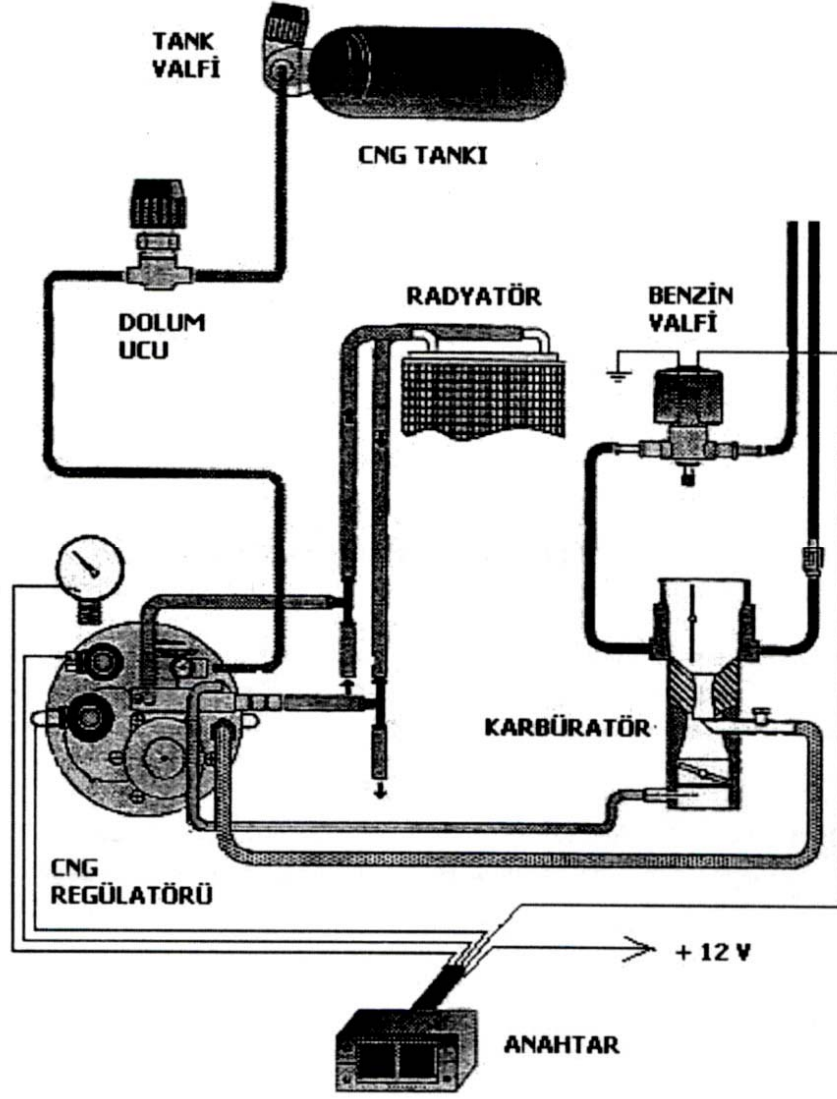
- **Tank**

Tesisatın en önemli parçalarından biridir. 300 bar basınçta test edilir ve 450 bar basınçta çalışacak şekilde tasarlanmıştır. Değişik kapasitelerde üretilmektedir. Bağlantı kuşakları ile araca sabitlenmektedir. Tank bagaja, karoser altına veya aracın üzerine monte edilebilmektedir. Aracın üzerine monte edildiği zaman direkt gün ışığından zarar görmemesi için bir koruma gerekmektedir. Bagajın altına monte edildiği zaman araç tam yüklü iken veya hareket halinde iken tankın yoldan en az 20 cm uzakta olması gerekmektedir. Eğer bagajın içinde ise, mutlaka vent boruları ve koruyucu kapak monte edilmelidir. Tank 5 yılda bir test edilmelidir.

Avrupa'daki uygulamalarda tankın son kullanma tarihi plastik bir etiketle dolun ucuna bağlanmakta ve dolun yapılan istasyonlarda bu etiket kontrol edilmektedir.

Etikette ayrıca montaj yapan firmanın ismi ve kayıt numarası bulunmaktadır. Beş yılda bir yapılması gereken periyodik testi yapılmamış bir tanka yapılacak dolumdan dolumu yapan istasyon yetkilileri sorumlu olmaktadır.

Para ve hapis cezasının yanı sıra istasyon kapatma cezası da uygulanmaktadır. Test edilmiş olan tank beş yıl daha kullanılabilir ve yeniden etiketlenmektedir. Bu prosedür her 5 yılda bir uygulanmak ve tank sağlam olduğu sürece kullanılmaktadır.



Şekil 2.25. Karbüratörlü araçta CNG tesisi

## 2.3. Hidrojenin Benzinli Motorlarda Kullanımı

### 2.3.1. Hidrojenin Fiziksel, Kimyasal Özellikleri ve Depolanması

Renksiz, kokusuz, tatsız ve saydam bir yapıya sahip olan hidrojen doğadaki en hafif kimyasal elemandır. Çeşitli yakıtların fiziksel ve kimyasal özellikleri Çizelge 2.3.' de verilmiştir. Gaz halindeki hidrojen, aynı hacimdeki havadan yaklaşık 14 kez daha hafiftir. İçten yanmalı motorlarda kullanılmakta olan yakıtlarla

karşılaştırıldığında ise, sıvı hidrojenin sıvı hidrokarbon yakıtlara oranla yaklaşık 10 kere daha hafif, gaz halindeki yakıtlardan yine 10 kere daha hafif olduğu görülecektir.

**Çizelge 2.5.** Çeşitli yakıtların fiziksel ve kimyasal özellikleri

		<b>Hidrojen</b>	<b>Metan</b>	<b>Metanol</b>	<b>Etanol</b>	<b>Benzin</b>
		<b>H<sub>2</sub></b>	<b>CH<sub>4</sub></b>	<b>CH<sub>3</sub>OH</b>	<b>C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH</b>	<b>C<sub>8</sub>H<sub>18</sub></b>
<b>C/H Oranı</b>		0	0,25	0,25	0,33	0,56
<b>Molekül ağırlığı</b>	Kg/kmol	2,02	16,04	32,04	46,07	91,4
<b>Özgül ağırlığı</b>	Kg/m <sup>3</sup> , sıvı	0,07	0,424	0,79	0,79	0,73
<b>Özgül ağırlığı</b>	Kg/m <sup>3</sup> , gaz	0,084	0,78			
<b>Isıl değeri</b>	Mj/kg	119,93	50,8	20,1	26,9	43,4
<b>Isıl değeri</b>	Mj/lt	8,41	20,8	15,9	21,3	31,8
<b>Buharlaştırma ısı</b>	Mj/kg	0,447	0,509	1,102	0,856	0,272
<b>Tutuşma sınırı</b>	% hacim	4,1-74	5-15,4		3,5-19	1,3-7,6
<b>Hava fazlalık katsayısı</b>	H.F.K.	0,15-4,35	0,59-2	0,24-2,22	0,29-1,92	0,26-1,67
<b>Alev hızı (laminer)</b>	m/s	2,91	0,37	0,52		0,37
<b>Ady. Alev sıcaklığı</b>	K	2383	2227	2151	2197	2266
<b>Dif. Ktsy.</b>	m <sup>2</sup> /sn	0,61	0,16			0,08
<b>Kay. Nok.</b>	K	20,65	117,7	338,1	351,7	305
<b>Donma nok.</b>	K	14		175,4	155,9	217
<b>Okt. sayısı</b>	ROS	130	130	110	106	91-100
<b>Okt. sayısı</b>	MOS		105	87	89	82-94

Hidrojenin motorlarda yakıt olarak kullanımında avantaj sağlayacak en önemli özelliklerinden biri tutuşma sınırlarının çok geniş yakıt karışım oranlarına uzanmasıdır.

Hidrojen, hava içersinde %4 ile %75 oranları arasında bulunduğunda tutuşabilmektedir. Benzin-hava karışımlarında, HFK' nın 0.3–1.7 değerleri arasında tutuşma sağlanabilmekte iken, hidrojen-hava karışımları için bu değer 0.14-4.35 değerlerine ulaşmaktadır. Hidrojen-hava karışımları, gaz yakıtlara göre daha geniş tutuşma sınırlarına sahiptir. Örneğin metan-hava karışımlarının tutuşabilmesi için HFK'nın 0.6-1.9 değerleri arasında bulunması gerekmektedir.

Hidrojen-hava karışımlarını ateşlemek için gerekli enerji miktarı da yakıtlara oranla çok düşüktür. (Hidrojen için 0.02 MJ, benzin için 0.55 MJ). Tutuşma garantisi sağlanması bakımından, bu durum Otto prensibi ile çalışan motorlarda avantaj sağlamaktadır. Ancak hidrojenin kolay tutuşması bazı sorunlar da yaratmaktadır.

Bu durum emniyet açısından bir dezavantaj olduğu gibi, hidrojen motorlarında görülen erken-tutuşma ve geri-tutuşma ihtimallerini artırmaktadır. Hidrojenin Otto motorlarında kullanılan yakıtlar için avantaj oluşturan diğer özellikleri de kendi kendine tutuşma sıcaklığının oldukça yüksek olması (1 atm basınçta 847-864 K) ve oktan sayısının yüksek olmasıdır.

Bu durum hidrojenin dizel motorlarından çok, Otto ilkesi ile çalışan motorlar için elverişli bir yakıt olacağını göstermektedir. Ancak dizel motorlarında ve çift yakıtlı dizel motorlarında (dizel yakıtı ve hidrojen) hidrojenin kullanıldığı çalışmalar da mevcuttur.

Hidrojenin yanma hızı da oldukça yüksektir. Stokiyometrik karışım oranlarında hidrojen-hava karışımlarının yanma hızı, benzin buharı-hava karışımlarının 7–8 katıdır. Hidrojenin difüzyon katsayısı da diğer motor yakıtlarından daha fazladır. Bu durum iyi bir karışım elde edilmesi, karışım oluşturma ve yarıma sürelerinin azaltılması bakımından avantaj sağlamakta olup verimi arttırmaktadır<sup>(16)</sup>.

Hidrojenin alt ısı değeri diğer motor yakıtlarından daha yüksektir. (Hidrojen için 119,93 kJ/g, benzin için 43,4 kJ/g). Ancak hacimsel olarak ele alındığında hidrojenin alt ısı değeri diğer yakıtlara nazaran daha azdır. (Hidrojen için 8.41 MJ/l, benzin için 31.8 MJ/l, metanol için 15.9 MJ/l, metan için 20.8 MJ/l). Hidrojenin adyabatik alev sıcaklığı ise benzinle aynı mertebelerdedir. (Hidrojen 2318K, Benzin 2470K, Metan 2148 K).

Hidrojenin gaz veya sıvı halinde depolanmasında ve taşınmasında çeşitli yöntemler kullanılmaktadır. Kullanılma amacına göre hidrojen çeşitli boyutlardaki stasyonier depolama sistemlerinde (sanayi tesislerinde, yakıt istasyonlarında vb.) taşınabilir sistemlerde (tankerlerde vb.) ve yakıt depolarında (otomobillerde vb.) farklı yöntemlerle depolanmaktadır. Taşıtlarda hidrojenin yakıt olarak kullanımı açısından her üç depolama şekli de önem taşımaktadır.

Hidrojenin depolanmasında kullanılan konvansiyonel yaklaşım basınçlı gaz veya sıvı olarak saklanmasıdır. Ancak günümüzde yeni geliştirilen teknolojilerde, hidrojen, metal hidritlerde veya aktif karbona emdiriliş olarak da depolanmaktadır.

Hidrojenin büyük miktarlarda depolanmasında kullanılacak en basit yaklaşımlardan biri, doğal gazın içinde bulunduğu türdeki yeraltı depolarından yararlanılmaktadır. Ancak bu tür depolardan gazın sadece %50 kadarı geri

kazanılabilmektedir. Günümüzde hidrojen genellikle standart gaz tüplerinde (50 l / 200 bar), yüksek basınçlı depolarda (200 bardan yüksek basınç altında düşük basınçlı küresel depolarda (15000 m<sup>3</sup> /12-16 bar basınçta) depolanmaktadır<sup>(16)</sup>.

Hidrojenin sıvı halde depolanması teknolojik ve ekonomik avantajlar sağlamaktadır. Ancak hidrojenin düşük sıcaklığının korunabilmesi için depoların perlit vb. maddelerden oluşan yalıtım malzemesi ile kaplanması gereklidir. Bu şekilde yapılmış ve hacimleri 100 litre ile 5000 m<sup>3</sup> arasında olan değişik boyutlarda depolar mevcuttur. Ancak bu depolardan buharlaşma yolu ile günde %0.1 mertebesinde kaçaklar olmaktadır. Taşıtlarda kullanılan küçük depolarda ise kaçaklar günde %2-3 mertebesine ulaşmaktadır.

Hidrojenin büyük kapasiteli depolarda sıvı olarak saklanmasına ilişkin uygulamalar, A.B.D.' deki uzay programları ile birlikte gelişme göstermiştir. Örneğin Keneddy Space Flight Center' deki 2000 m<sup>3</sup> kapasiteli sıvı hidrojen deposu 1940' lı yıllardan beri kullanımdadır. Sıvı hidrojen deposu maliyetleri deponun boyutlarına bağlı olarak, 16-130 \$/kg H<sub>2</sub> arasında değişmektedir. Hidrojenin sıvılaştırılması ise 1 kg H<sub>2</sub> başına 10-13 kWh enerji gerekmektedir<sup>(16)</sup>.

Hidrojenin depolanmasında yaygınlaşan yöntemlerden biri de metal hidritlerin kullanımınıdır. Bu yaklaşımda hidrojen molekülleri parçalanarak, hidrojen atomları metallerin gözenekleri içerisinde saklanmaktadır. Burada depolanan yakıt miktarı metal alaşımının yoğunluğuna bağlı olarak değişmektedir. Hidrojenin metal alaşımının gözeneklerinden ayrılması için, tekrar dışardan enerji uygulanmaktadır. Bu sistemin başarılı olması özgül hacminin büyük ve uygulanan dönüşüm enerjisinin düşük olmasına bağlıdır. Günümüz teknolojisinde metal hidrit depolu taşıtların menzilli 150-180 km mertebesindedir.

Karayolu taşıtları üzerinde hidrojenin depolanması amacıyla kullanılmakta olan üç yaklaşım mevcuttur.

Hidrojenin atmosfer sıcaklığında ve 200 bar basınç altında gaz olarak depolanması durumunda enerji yoğunluğu oldukça azalmaktadır. Ancak geliştirilmekte olan alüminyum alaşımlı basınçlı tüplerde hidrojen 300 bar mertebesindeki basınca kadar sıkıştırıldığında depo ağırlığı 1 kg H<sub>2</sub> için 30 kg'a ve özgül hacim de 62 lt/kg GH<sub>2</sub> değerine ulaşmaktadır.

Ayrıca uzay ve havacılık çalışmalarında gaz ve hidrojenin 690 bar basınca sıkıştırılarak depolanmakta olduğu uygulamalar da gerçekleştirilmiştir. Depo ve yakıt ağırlığının ve hacminin fazla olması nedeniyle, bu yaklaşım ancak kısa menzilli taşıtlarda uygulanabilmektedir.

### **2.3.2. Hidrojenin Üretimi**

Hidrojen, metandan, suyun elektrolizinden ve Rusya' nın Sibiry'a daki yeraltı hidrojen kaynakları için düşünülmekte olan sondaj yöntemlerinin biriyle üretilebilir. En uygun metod, suyun güneş enerjisi ile elde edilen elektrikle elektrolizidir. Güneş enerjisi ile sadece Amerika'daki araçların günlük ihtiyacını karşılamak için 50000 km<sup>2</sup> güneş paneli gerekir. Bu da New Mexico' nun 1/5' idir<sup>(16)</sup>.

### **2.3.3. Benzinli Motorlarda Hidrojen Kullanımı**

Hidrojen yakıtlı motorlarda yanma karakteristiklerini, kirletici egzoz gazları emisyonunu ve dolayısı ile motor performansını etkileyen en önemli etken karışımın hazırlanış yöntemidir<sup>(24)</sup>. Hidrojen ile havanın karışımı, sırasıyla harici ve dahili



olarak adlandırılan yöntemlerle, motorun yanma odası içerisinde veya motorun emme manifoldunda hazırlanmaktadır. Hidrojenin difüzyon hızının yüksek olması nedeniyle, her iki yöntemde de yanma başlangıcında homojen bir karışım elde etmek mümkün olmaktadır.

### **2.3.3.1. Harici karışım hazırlama yöntemi**

Harici karışım hazırlama yönteminde, bir gaz karıştırıcı yardımıyla, hava ile hidrojen karıştırılarak düşük basınçlarda motorun emme manifolduna sürekli olarak veya kesikli olarak gönderilmektedir. Hidrojen-hava karışımlarının geniş tutuşma özelliğinden yararlanılarak, Diesel ilkesi ile çalışan motorlarda olduğu gibi, yüke bağlı olarak karışım ayarı yapılabilmektedir. Bu durumda gaz keleşi kullanılmayacağından, kısılma kayıpları azalacak ve motorun volumetrik veriminde ve dolayısı ile maksimum gücünde artış sağlanabilecektir.

Diğer taraftan hidrojen yakıtlı motorların ilk uygulamalarından itibaren ortaya çıkmış olan geritutuşma ve erken-tutuşma sorunları bu yöntemde görülmektedir. Geri-tutuşma, yanma odasına gönderilmekte olan karışımın emme tamamlanmadan çeşitli etkenlerle tutuşması sonucu motorun emme manifoldunda alevin geriye doğru iletilmesidir. Bu olay emme sistemi elemanlarına zarar verebileceği gibi emniyet açısından da sakıncalıdır.

Geri-tutuşma sorununun önlenbilmesi, emme manifoldunda tutuşmaya hazır karışımın bulundurulmaması veya bulunma süresinin kısaltılması ile sağlanabilmektedir. Bunun için de ya karışım dahili olarak hazırlanmalı, ya da geri-tutuşma olasılığını azaltmak için yakıt gönderme işlemi zamanlamalı olarak yapılmalı ve emme manifoldu yeterince soğutulmalıdır.

Erken tutuşma ise, yanma odası içerisine gönderilen karışımın buji tarafından ateşleme zamanından önce tutuşmasıdır. Hidrojenin tutuşma enerjisinin düşük olması nedeniyle, yanma odasındaki sıcak noktalar, supap bindirmesi sırasındaki sıcak egzoz gazları, motorun yağlama yağından gelen sıcak partiküller veya artık gazlarla yeni dolgunun teması sonucu yanma amalanandan daha önce başlayabilmektedir. Erken tutuşmanın önlenbilmesi için yanma odası sıcaklıklarının düşürülmesi gerekmektedir. Özellikle yerel olarak oluşacak sıcak noktaların önlenmesi önem taşımaktadır. Bu nedenle hidrojen motorlarında soğutma sistemi tasarımı önem taşımaktadır.

Yanma odası sıcaklıkları egzoz gazı resirkülasyonu (EGR) uygulanarak veya yanma odasına su püskürtülerek düşürülebilir. Ayrıca karışımın fakirleştirilmesi sonucunda da yanma sıcaklıkları düşürülebilmektedir. Ancak aşırı düzeydeki EGR veya fakir karışım uygulamalarında çevrimden çevrime farklılıklar artacak ve motor düzgün çalışmayacaktır.

Yakıt olarak sıvı hidrojen kullanıldığında, buharlaşan yakıtın ortamı soğutma etkisinden de yararlanılabilmektedir. Ayrıca supap bindirme süresinin kısaltılması da erken tutuşma olasılığını azaltacaktır.

Uzun yıllardır hidrojen yakıtlı motorlarda çok sayıda araştırmaya konu olan bu iki soruna çözüm olarak dahili karışım hazırlama yöntemleri oldukça etkili olmaktadır.

### 2.3.3.2. Dahili karışım hazırlama yöntemi

Hidrojenin emme zamanında veya sıkıştırma zamanında direkt olarak yanma odasına gönderilmesi geri tutuşma ve erken tutuşma sorunlarına çözüm getirebilmektedir. Karışımın geç hazırlanması emme kanalında tutuşabilecek yakıt-hava karışımının mevcudiyetini kısıtladığı için geri tutuşma olayını da önlemektedir. Yakıt gönderme işlemi, emme supabı kapandıktan sonra, yanma odası içerisine yapıldığında emme manifoldunda yakıtın tutuşması sorunu ortadan kalkacaktır. Yakıt püskürtme zamanı ayarlanarak, sıkıştırma zamanının sonlarına doğru hidrojen silindire gönderildiğinde ise erken tutuşma sorununa da çözüm sağlanmaktadır. Ancak püskürtme işlemi geciktirilerek, emme zamanından sıkıştırma başlangıcına kaydırıldığında püskürtme basıncının da yükseltilmesi gerekmektedir. Püskürtme işlemi, yanma odası basıncının daha da yüksek olduğu sıkıştırma sonuna kaydırıldığında ise daha da yüksek püskürtme basıncı gerekecektir. Yanma odasına sıvı halde hidrojen püskürtülmesi durumunda, püskürtme sistemi açısından bazı kısıtlamalar ortaya çıkmakta ve püskürtme pompalarının yağlama sorunları gibi araştırmaya açık noktalar bulunmaktadır<sup>(25)</sup>.

Dahili karışım hazırlama yöntemlerinin avantajlarından yararlanabilmek için sıvı halde hidrojen kullanılmaktadır. Bu durumda yaklaşık 10 MPa basınçla yakıt her silindire ayrı ayrı püskürtülmektedir. Yüksek basınçlı püskürtme işleminde, emme zamanında silindir ortamına sadece hava gönderilmekte ve supaplar kapandıktan sonra silindir içerisine yakıt püskürtülerek bir çeşit aşırı doldurma uygulanmakta ve motorun maksimum gücünde artış sağlanabilmektedir. Burada hidrojenin difüzyon katsayısının yüksek olması özelliğinden yararlanılarak hava ile homojen olarak karışımı kısa zamanda sağlanabilmektedir.

Dahili karışım hazırlama yönteminin kullanıldığı hidrojen motorlarında da hidrojen-hava karışımlarının çok geniş tutuşma sınırlarına sahip olması özelliğinden yararlanılarak yük durumuna bağlı olarak farklı hava fazlalık katsayısı değerlerinde motorun çalıştırılması mümkündür. Bu durumda, gaz keleşinin kaldırılması ile birlikte emme sistemindeki kısılma kayıplarının azalması sonucu volumetrik verimde artış sağlanacaktır.

Performans açısından değerlendirildiğinde, gaz halde hidrojenin kullanımı sonucu, eşdeğer benzin motoruna oranla motorun maksimum gücünde bir miktar azalma olmaktadır<sup>(26)</sup>. Benzin motorlarında, stokiyometrik karışımlarda tam buharlaşmış benzinin yanma odası içerisindeki hacimsel oranı %1.7 mertebesindedir. Buna karşılık gaz hidrojen silindir hacminin yaklaşık %30 kadarını kaplamaktadır. Karışımların ısı değerlerine bakıldığında, hidrojen yakıtlı motorda %15 mertebesinde güç düşüşü görülecektir. Sıvı halde hidrojenin aynı şartlar altında, ancak emme supabı kapandıktan sonra yanma odası içerisine püskürtülmesi durumunda benzin motoruna oranla %20, ön karışimli hidrojen motoruna oranla da %40 mertebesine varan güç artışı sağlanabilecektir. Diğer taraftan sıvı hidrojenin emme süreci boyunca, emme manifoldunda püskürtülmesi durumunda da buharlaşan yakıtın sağladığı etkiden yararlanılarak volumetrik verimin artırılması mümkün olduğundan, gaz halde hidrojen kullanımına oranla güçte bir miktar artış sağlanabilmektedir.

### 2.3.3.3. Hidrojen Yakıt Pili Motorlar

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

İlk yakıt hücresi 1839 yılında Sir William Grove tarafından tasarlanmıştır [5]. Grove önce seyreltik sülfürik asit çözeltisine daldırılmış iki platin elektrottan oluşmuş bir sistemde hidrojen ve oksijen üretmeyi başarmıştır. Yaptığı çalışmalarla suyun elektrolizinin ters reaksiyonu sonucunda sabit akım ve gücün üretildiğini fark eden Grove, böylece tesadüfi olarak büyük bir buluş gerçekleştirmiştir. Sonraki yıllarda ise önceki çalışmasında kullandığı sistemin bir dizisini seri bağlayarak daha fazla elektrik akımı üretmeyi başarmıştır.

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

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

#### 2.3.3.4. Yakıt pili çalışma prensibi

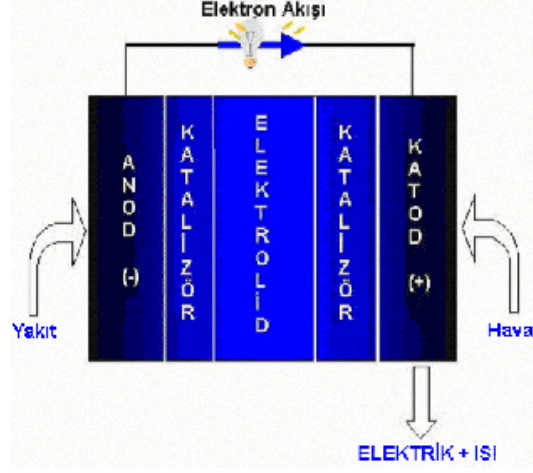
Yakıt pilinde gaz yakıtlardaki kimyasal enerji, düşük enerjili minimum hareket içeren ve hava kirliliğine sebep olmayan elektrokimyasal bir prensiple temel olarak elektrik ve ısı enerjisine dönüştürülür. Yakıt pili, yakıt (direkt kullanımda; hidrojen, dolaylı kullanımda ise; doğal gaz, LPG, metanol vb.)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

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

Temel olarak bir yakıt pili; anot, katot ve elektrolit kısımlarından oluşur. Ayrıca reaksiyonu hızlandırmak için yakıt pili tipine göre farklı katalizörler kullanılır.

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

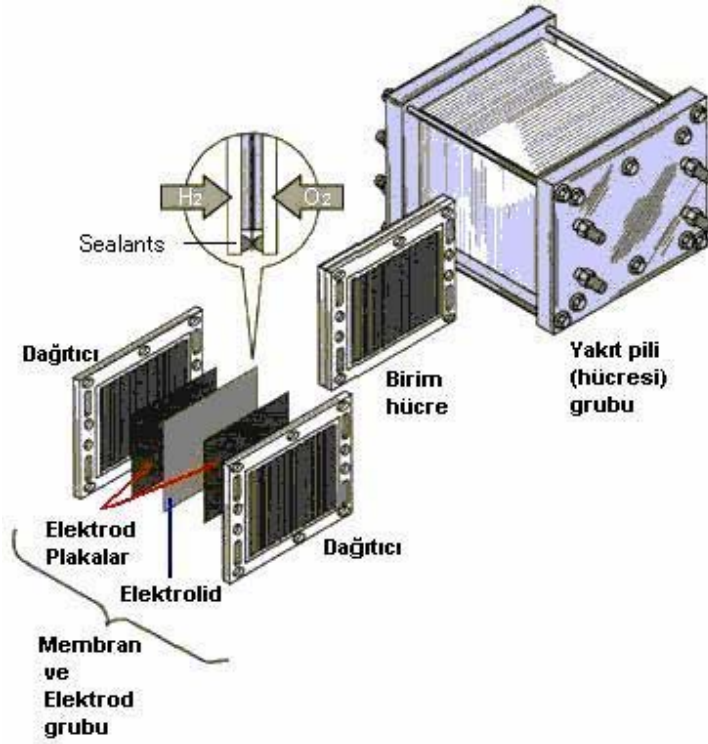
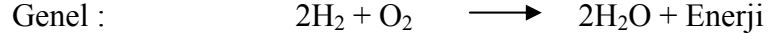
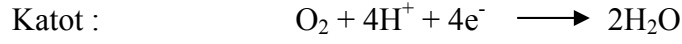
olarak genellikle platinyum malzemeden katalizör kullanılır.



Şekil 2.26. Şematik yakıt pili

Yakıt pilinde tek bir hücre gerilimi 1 volttan daha az olduğundan, gerekli elektrik enerjisini üretmek için birden fazla yakıt hücresini seri bağlayarak kullanmak gereklidir. Bu hücrelerin arasına iki kutuplu levhalar yerleştirilmelidir. Bu levhalar, elektrotlara gazın sağlanması ve hücrelerin elektriksel olarak bağlanmasını sağlarlar. Sandviç şeklindeki bu hücre ve levha grubuna “Yakıt hücresi grubu“ adı verilir.

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



Şekil 2.27 Yakıt pili birimleri (THREE BOND)

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



Teorik olarak yakıt hücreleri, okside olabilen tüm akışkanları dönüştürebilirler. Pratikte ise hidrojen ve hidrokarbon yakıtlar arasında farklar meydana gelmektedir. Bütün yakıt hücresi çeşitleri, yukarıda anlatılan yöntemle hidrojeni dönüştürebilirler. Fakat hidrokarbonların kullanılmasında, dönüşüm için ya çok büyük katalizör yüzeyi yada çok yüksek sıcaklık gerektiren oksidasyon problemleri vardır. Bu nedenle hidrokarbon yakıtlar, yakıt hücresinde önce su buharıyla reforme edilerek hidrojen üretiminde kullanılmasıyla, yani dolaylı yollardan kullanılabilirler. Bu nedenle de hidrokarbon yakıt kullanılan yakıt pillerinin verimi direkt hidrojen kullanılan yakıt pillerine göre daha düşüktür.

### 3. ARAŞTIRMA BULGULARI VE SONUÇLAR

Motorlar kullanılış maksatlarına göre belli özelliklere sahip değişik sistemlerin bir parçasıdır. Motorlu bir taşıtı göz önüne alırsak, taşıtın hareket ve performansı kütlesine, sürtünmelere, yolun eğimine, rüzgara, dişli tahvil oranına ve daha birçok faktöre bağlıdır. Bütün bu faktörlerin etkilerinin tek bir statik deney tesisatında simule edilmesi pratik olarak zordur. Bu bakımdan motorlarla ilgili deneylerin hepsi benzer esaslar ihtiva etmekle birlikte, deney amacına uygun olarak donanım ve uygulama yönünden önemli farklılıklar gösterebilirler.

Bu çalışmada alternatif yakıtların motor performanslarına etkileri incelenmiştir. Bu nedenle performans değerlerinin tespiti için kullanılan deney sistemlerinden ve test tiplerinden bahsetmek doğru olacaktır. Ayrıca ilerleyen aşamalarda alternatif yakıtların motor performansına etkileri deneysel olarak derlenmiştir.

#### 3.1. Motor Performans Değerlerinin Ölçümü

Motor deneyleri genel olarak

- a) Bir motorun; yapımçı firmanın garanti ettiği karakteristik özellikleri gerçekleştirip gerçekleştirmediğinin kontrolü,
- b) Motorları geliştirme çalışmalarında; çeşitli yapısal (konstrüktif) ve işletme özelliklerinin motor karakteristikleri üzerindeki etkilerinin belirlenmesi amaçları ile yapılır.

Bu amaçlarla, motorların istenen bazı işletme büyüklüklerinin sabit tutulabildiği ve istenen bazı büyüklüklerin değiştirilebildiği bir deney düzeneğine bağlanmaları ve çalıştırılmaları gerekir. Böylece motor çeşitli koşullar altında çalışırken gerekli moment, devir sayısı, yakıt debisi, emme havası debisi, soğutma suyu debisi, ortam sıcaklığı ve nemi, egsoz gazlarının sıcaklığı, soğutma suyunun giriş ve çıkış sıcaklıklarıdır.

Motor deneyleri sonunda ölçülen bu değerler kullanılarak efektif güç, ortalama efektif basınç, efektif verim, döndürme momenti, özgül yakıt tüketimi, vb. gibi büyüklükler hesaplanır ve ölçülen veya hesaplanan değerlerin (karakteristiklerin) devir sayısına, hava fazlalık katsayısına, güce, değiştirilen yapısal özelliklere (örneğin sıkıştırma oranına) göre değişimleri elde edilir İstenirse bu sonuçlar eğriler şeklinde de değerlendirilir, bilinmeyen büyüklükler ölçülür. İleri düzeydeki araştırma çalışmalarında bunların dışında; motorların aşağıda bazı örnekleri verilen birçok özellikleri de deneysel yollarla incelenmektedir.

- **İndikatör diyagramı**

Silindir içindeki basınç değişimini gösteren indikatör diyagramı günümüzde elektronik yollarla duyarlı bir şekilde belirlenebilmektedir. Elektronik yöntemle indikatör diyagramının belirlenmesinde, silindir içindeki basınç değişimi bir transducer ile elektrik sinyallerine dönüştürülmekte, daha sonra bu sinyaller bir amplifikatörde yükseltılarak bir osiloskopa gönderilmektedir. Basıncın krank açısına veya silindir hacmine göre değişimi osiloskopun ekranında gözlenebilmekte, istenirse fotoğrafı da çekilebilmektedir. Bu yolla çeşitli motor karakteristiklerinde yapılacak değişikliklerin indikatör diyagramı üzerindeki etkileri deneysel olarak

incelenebilmekte, ayrıca indikatör diyagramı ile teorik hesaplama yöntemlerinin doğruluk derecesi kontrol edilebilmektedir.

- **Egzoz gazları**

Egzoz gazları çeşitli kimyasal yollarla analiz edilerek motor karakteristiklerinin egzoz gazları ve dolayısı ile yanma üzerindeki etkilen incelenebilmektedir.

- **Sıcaklık dağılımları**

Değişik motor elemanları üzerine yerleştirilen elektronik temeli termometrelerle sıcaklık dağılımının, ısıl yüklerin çeşitli karakteristiklere bağlı olarak nasıl değiştikleri incelenebilmektedir.

- **Gaz akışı olayları**

Motorların emme ve egzoz kanallarındaki gaz akışı olayları ve silindir içindeki gaz hareketleri, kızgın tel anemometresi veya Laser-Doppler anemometresi yardımı ile deneysel olarak incelenebilmektedir. Böylece motorların emme ve egzoz donanımlarının ve yanma odalarının geliştirilmesine çalışılmaktadır.

- **Motor deneyi çeşitleri**

Motorlar uygulamada çoğunlukla ya taşıtlarda, ya da stasyoner olarak (generatörlerde veya inşaat makinalarında) kullanılmaktadır. Bu kullanım alanlarına göre motorlardan beklenen özellikler farklı farklıdır. Örneğin; bir taşıt motoru sabit gaz durumunda motor yüküne göre belirli bir alt ve üst devir sayısı aralığında çalışmalı ve bu aralıkta özellikleri bilinmelidir. Öte yandan bir santral motoru, üretilen elektriğin belirli bir frekansta olması için, sabit devir sayısında çalışmalıdır.

Motorların bu iki ayrı tür çalışma koşuluna uygun olarak, motor deneyleri de iki tür olabilir.

- **Taşıt Motorları Deneyleri**

Taşıtlarda, motorun ürettiği güç, güç aktarma donanımı (kavrama, dişli kutusu, diferansiyel ve akslar) tarafından tekerleklere iletilir ve taşıtın hareketini sağlar. Taşıtların kalkış ve duruşlarında ve çeşitli yol koşullarındaki hareketlerinde gerekli döndürme momenti ve devir sayıları farklı farklıdır. Motorun, taşıtın çalışma koşullarına uyum sağlayabilmesi için, değişik gazlarda ve devir sayılarında çalışması gerekir. Bu nedenle taşıt motorları, sabit gaz durumlarında değişik devir sayılarında denenir.

Taşıt motorlarının değişik hızlarda denenebilmesi için; tam gaz, 3/4 gaz, 1/2 gaz, 1/4 gaz gibi istenen gaz durumlarında en düşük ve en yüksek hızların aralığında çalıştırılmaları gerekir. Bu amaçla motor çalıştırdıktan sonra; bir taraftan gaz artırılırken, bir su freni veya generatör aracılığı ile yavaş yavaş yüklenir. Gaz kolu istenen konuma geldiğinde motor uygun şekilde yüklenerek en düşük devirde kararlı çalışması sağlanır. Bu yük altında motorun devir sayısı en düşük (minimum) devir sayısıdır. Daha sonra yük yavaş yavaş azaltılarak motorun devir sayısının artması sağlanır. Her adımda; devir sayısı, döndürme momenti vb. gibi motorun istenen karakteristikleri ölçülür. Her hızdaki ölçüm yapılırken motorun en az 1 dakika kararlı olarak çalışması gerekir. Böylece, belirli gaz konumunda, en düşük devirden en yüksek devire kadar motorun karakteristikleri belirlenmiş olur. Benzer işlemler istenirse değişik gaz konumlarında da yinelenir.

Ölçülen değerler kullanılarak efektif güç, ortalama efektif basınç, özgül yakıt tüketimi, efektif verim vb. gibi çeşitli teknik büyüklükler hesaplanır. Daha sonra

hesaplanan bu değerler devir sayısına bağlı olarak eğriler şeklinde veya performans eğrileri biçiminde çizilir.

- **Stasyonel Motor Deneyleri**

Elektrik santralleri, şantiye ve inşaatlar gibi alanlarda kullanılan stasyonel motorların yükleri en düşük değerden başlamak üzere yavaş yavaş artırılır ve her yükleme durumunda gaz ayarlanarak devir sayısının sabit kalması sağlanır. Böylece sabit devir sayısında çeşitli yüklerde motorun karakteristik değerleri belirlenir ve daha sonra gerekli işlemler yapılarak istenen büyüklükler hesaplanır Ölçülen veya hesaplanan bu değerler motor gücüne bağlı eğriler şeklinde değerlendirilir.

- **Motor Geliştirme Deneyleri**

Motor geliştirme çalışmalarında, motor belirli bir gaz konumunda çalışırken sıkıştırma oranı, ateşleme avansı, yakıt-hava oranı vb. gibi teknik özelliklerden biri değiştirilir Örneęin her sıkıştırma oranında yükleme ayarlanarak motorun devir sayısının sabit kalması sağlanır. Her adımda gerekli büyüklükler ölçülür. Elde edilen sonuçların değerlendirilmesi ile; sıkıştırma oranının motorun çeşitli teknik özelliklerini nasıl etkilediği ve en uygun sıkıştırma oranının ne sečilmesi gerektiği belirlenmiş olur.

- **Motor deneyleri**

Yukarıda genel olarak açıklanan motor deneylerinin gerçekte olabilmesi için üzerinde:

1. Motorun yüklenmesini ve döndürme momentinin ölçülmesini sağlayacak bir yükleme elemanı,
2. Devir sayısını ölçmeye yarayan bir takometre,

3. Yakıt tüketimini ölçmeyi sağlayan bir ölçekli kap,
  4. Hava debisini ölçmeye yarayan bir orifis veya lüle ve bir sıvılı manometre düzeneği,
  5. Soğutma suyunun debisini ölçmeye yarayan bir lüle ve manometre veya rotametre düzeneği,
  6. Egsoz gazlarının sıcaklığını ölçmeye yarayan bir termokupl termometre ve göstergesi,
- Emme havası giriş, soğutma suyu giriş ve çıkış sıcaklıklarını ölçmeye yarayan termometre ve göstergeler.

Motor deneylerinde üretilen gücü yutan ve yüklemeyi sağlayan iki tür yükleme elemanı kullanılır.

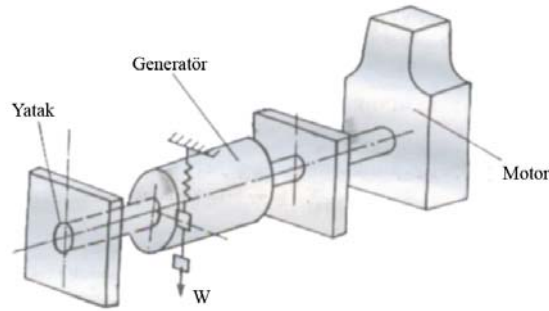
- **Jeneratör ile Yükleme (Elektrik Dinamometresi)**

Motorun mili bir jeneratöre bağlanırsa, motorun ürettiği güç elektrik enerjisine çevrilmiş olur. Bu elektrik enerjisi paralel bağlı dirençlerde ısıya dönüştürülerek harcanabilir. Anahtarlarla kumanda edilen dirençlerden istenilen kadarı devreye sokularak motorun yükü ayarlanmış olur. Motor ile böyle bir dinamometrenin bağlantısı Şekil 3.1 ve Şekil 3.2’de şematik olarak gösterilmiştir.

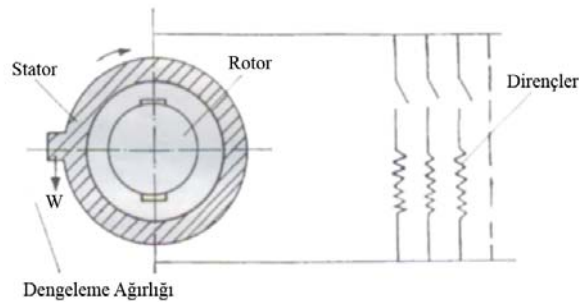
Şekillerde görüldüğü gibi elektrik dinamometresinin rotoru denenecek motor miline, statoru ise bir dengeleme düzeneğine bağlanmıştır. Dinamometre (jeneratör) çalışırken, yani elektrik üretirken statorda bir zıt elektromotor kuvvet oluşur ve stator rotorun dönme yönünde dönmek ister. Motorun mekanik gücü veya dinamometreden çekilen elektriksel güç arttıkça, etki eden döndürme momenti de büyür. Statorda bu şekilde oluşan moment; motor milindeki döndürme momentine eşittir.

Dinamometrenin statoruna etkiyen bu moment bir dengeleme sistemi ile dengelenebilir ve ölçülebilirse, motorun döndürme momenti belirlenmiş olur.

Bu amaçla stator, iki ucundan serbestçe dönmesine olanak sağlayan yataklar üzerine oturtulur. Öte yandan statora etki eden moment, bir ucu moment koluna bağlı ve diğer ucu yere sabit olarak tutturulmuş bir yaylı terazi ve moment koluna asılan ağırlıklar tarafından dengelenir. Söz konusu bağlantının şekli Şekil 3.1’de şematik olarak gösterilmiştir.



**Şekil 3.1.** Bir motor ve elektrik dinamometresinin bağlanması



**Şekil 3.2.** Bir elektrik dinamometresi ve yüklemeye dirençlerinin şematik resmi

Motor dururken döndürme momenti veya ona eşit olarak statora etki eden moment sıfırdır. Bu durumda moment koluna W ağırlığı asılmış ise, terazi yayı, yay



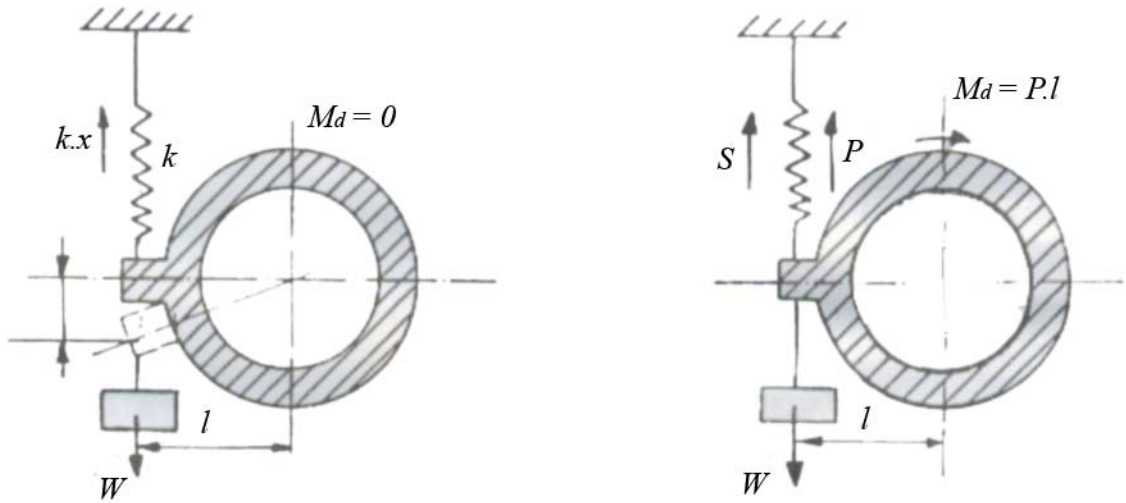
katsayısı  $k$  olduğuna göre,  $x=W/k$  kadar uzar. Yaylı terazi  $W$  ağırlığına karşı gelen bir rakamı gösterir. Denge durumunda aşağı doğru  $W$  ağırlık kuvveti, yukarı doğru  $kx$  yayın geri döndürücü kuvveti etki eder.

Motor çalışırken statora etki eden, motorun döndürme momentine eşit  $Md$  momenti yaylı terazinin bağlı olduğu kuvvet kolunu, döndürme momentinin büyüklüğüne bağlı olarak yukarı doğru bir miktar hareket ettirir. Bu durumda terazi yayının etki ettirdiği geri döndürücü kuvvet, ibreden  $S$  olarak okunur Denge durumunda sisteme etki eden kuvvetler:

**Aşağı doğru :**  $W$  ağırlığı,

**Yukarı doğru:**  $S$  geri döndürücü kuvveti ve statora etki eden  $Md$

momentine karşı gelen  $P$  kuvvetidir



**Şekil 3.3. a.** Motor dururken statora etki eden kuvvetler

**b.** Motor çalışırken statora etki eden kuvvet ve momentler

olur. Bu kuvvetler arasında

$$W = P + S \quad (3.1)$$

bağıntısı yazılabilir. Böylece motorun döndürme momenti,  $l$  moment kolu uzunluğu olmak üzere

$$P = W - S$$
$$Md = P \cdot l \quad (3.2)$$

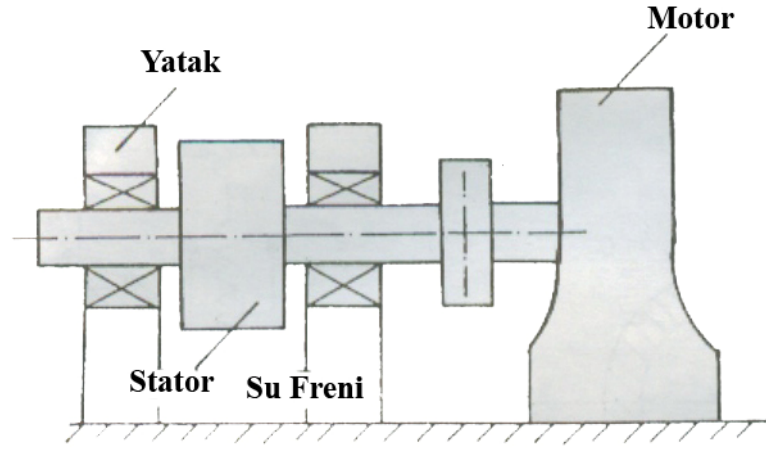
bağıntılarından kolaylıkla hesaplanır.

- **Su Freni ile Yükleme**

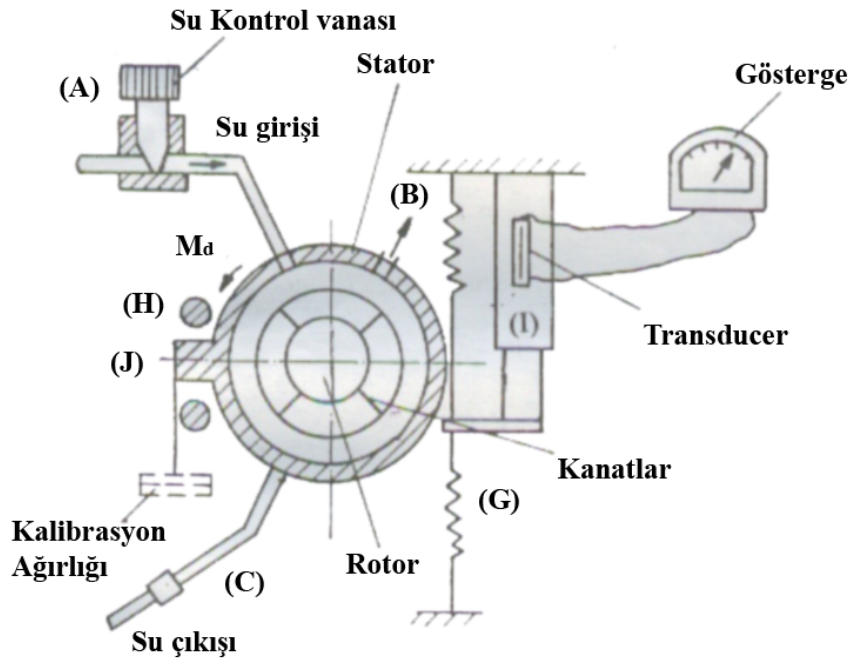
Motor deneylerinde yükleme ve momenti ölçümü için uygulanan en yaygın yöntemlerden biri de su freni (hidrolik fren) dir. Hidrolik frenlerde genellikle sıvı olarak su kullanılır.

Su frenleri motor yüküne bağlı olarak çeşitli tiplerde yapılmakta ise de çalışma ilkeleri tümünde aynıdır. Su freni, motor miline bağlı olarak dönen özel kanatlı bir rotor ve rotoru çevreleyen, yataklar üzerine oturtulmuş bir stator dan oluşur. Statorun iç tarafında da kanatlar olabilir ve statora elektrik dinamometresindeki gibi bir momenti ölçme düzeneği eklenir.

Şekil 3.4'te olduğu gibi statorun içi belirli bir düzeye kadar su ile doldurulur. Motor rotoru çevirmeye başladığında, rotorun kanalları suyu dışa doğru fırlatır ve çevrede girdap hareketleri yapan bir su tabakası oluşur. Böylece girdap, dönme hareketleri ve radyal hareketler gibi karmaşık hareketler yapan su bir taraftan ısınarak motorun ürettiği mekanik enerjiyi yutarken, öte yandan motorun döndürme momentine eşit bir momentle su freninin statorunu çevirmeye çalışır.



Şekil 3.4. Bir su freninin motora bağlanması



Şekil 3.5. Bir su freninin ve dinamometrenin şematik resmi

Stator iki ucundan rulmanlı olarak yataklanmıştır ve üzerine etki eden momentin etkisi ile dönmek ister. Statora eklenen yaylı bir biçme düzeneği ile hem

statorun dönmesi sınırlanır, hem de söz konusu motorun döndürme momentine karşı gelen ve moment koluna etki eden kuvvet ölçülür. Şekil 3.5'te gösterilen düzenekte  $I$  çubuğuna yapıştırılmış ve uygun şekilde kalibre edilmiş transducer'lar aracılığı ile döndürme momenti bir göstergeden okunabilir. Deneyden önce  $J$  koluna asılan, bilinen ağırlıkların moment etkilerinden yararlanılarak, motor dururken transducer'ın kalibrasyonu yapılır.

Su freninin içindeki su zamanla ısınacağı için sürekli olarak değiştirilmelidir. Frenin içindeki su miktarı arttıkça yutulan enerji de artar. Su girişine yerleştirilen ayarlanabilir bir  $A$  vanası ile, su miktarı ve sonuçta motorun yüklenmesi istenilen şekilde ayarlanır.

## **3.2. Alternatif Yakıtların Performans Değerlerine Etkileri**

### **3.2.1. Benzin ve LPG Kullanılan Motorlarda Performans Karşılaştırması**

LPG çeşitli sanayi uygulamalarında, ısıtmada, evlerde, tarımda ve motorlu taşıtlarda enerji kaynağı olarak kullanılmaktadır. İçten yanmalı motorlarda benzin ve dizel yakıtına alternatif olarak kullanımı mümkündür. Benzinin ve dizel yakıtının kaynama sıcaklıkları normal ortam sıcaklıklarının üzerinde olmasına karşın LPG 0°C sıcaklığın altındaki ortamlarda buharlaşmaktadır. Bu nedenle konvansiyonel yakıtlar taşıt üzerindeki yakıt depolarında, atmosfer basıncı altında sıvı olarak saklanabilirken, LPG'nin yakıt tankında sıvı fazında depolanması için yüksek basınca gerek vardır. DIN 51600 standardına göre, 38 °C sıcaklıkta yaz benzininin 0.7 bar, kış benzininin 0.9 bar değerlerini geçmeyen buhar basıncına sahip olması gerekmektedir. Ancak propan için bu sıcaklıktaki buhar basıncı değeri 3,5 bar bütan için 2.6 bar dır. Bu nedenle LPG yakıtlar taşıt üzerinde 4-10 bar arasında değişen basınçlar altında depolanır.

Benzin ve dizel yakıtına oranla LPG'nin birim kütlesinin alt ısı değeri daha yüksektir. Bu değer LPG bünyesindeki propan/bütan oranına bağlı olarak değişmektedir.(Çizelge 3.1)

**Çizelge 3.1.** Çeşitli motor yakıtlarının karşılaştırılması<sup>(17)</sup>

<b>Özellikler</b>	<b>Propan</b>	<b>Bütan</b>	<b>Benzin</b>	<b>Dizel yakıtı</b>
<b>Yoğunluk 15°C (kg/litre)</b>	0,508	0,584	0,73-0,78	0,81-0,83
<b>Buhar basıncı 38 °C (bar)</b>	12,1	2,6	0,5-0,9	0,003
<b>Kaynama noktası (°C)</b>	-43	-0,5	30-225	150-560
<b>RON</b>	111	103	96-98	
<b>MON</b>	97	89	85-87	
<b>Alt ısı değeri (Mj/kg)</b>	46,5	45,46	44,03	42,4
<b>Alt ısı değeri (Mj/lt)</b>	23,42	26,55	32,32	35,62
<b>Stokiyometrik oran</b>	15,8	15,6	14,7	
<b>Karışımın ısı değeri (kJ/m<sup>3</sup>)</b>	3414	3446	3482	

Bu nedenle özgül yakıt tüketimi bakımından (g/kWh), LPG yakıtlı motorlar benzin ve dizel yakıtlı motorlara göre daha avantajlıdır. Ancak LPG'nin özgül kütlelerinin daha düşük olması nedeniyle, hacimsel açıdan yakıt tüketimi karşılaştırıldığında LPG'nin avantajlı olmadığı görülmektedir. Birim hacimdeki enerji eşdeğerine bakıldığında, teorik olarak hacimsel yakıt tüketimi benzine oranla propan için 1.38 (32.32 Mj/litre /23.42 Mj/litre) ve bütan için 1.22 (32.32 Mj/litre / 26.55 Mj/litre) kat daha fazladır. Ancak gaz yakıtların hava ile daha iyi karışma özelliğine sahip olmaları nedeniyle, daha homojen bir karışım elde edilmekte, silindirler arası farklılıklar azalmakta ve motor performansı % 8-10 mertebelerinde iyileşmektedir. Bu durumda gerçek yakıt tüketimi katsayıları propan için 1.27 ve bütan için 1.11 mertebelerine düşmektedir<sup>(18)</sup>.

Propan/bütan oranı 50/50 mertebesindeki LPG'nin alt ısı değeri 46.0 Mj/kg veya 546.1 kg/m<sup>3</sup> (25.1 Mj/litre)'dir. Stokiyometrik karışımın sahip olduğu ısı değerler açısından durum incelendiğinde, karışımın alt ısı değeri benzin için 3482 kJ/m<sup>3</sup>, propan için 3414 kJ/m<sup>3</sup> ve bütan için 3446 kJ/m<sup>3</sup> mertebesinde olup propan/bütan oranı 50/50 mertebesindeki LPG için 3430 kJ/m<sup>3</sup>'tür.

Bu nedenle LPG yakıt kullanımı sonucunda benzine oranla motor gücünde, teorik olarak, % 2 mertebesine varan bir düşüş beklenir. Ancak motor parametrelerinin aynı performansı sağlayacak şekilde kontrolü de mümkündür. Genellikle pratikteki uygulamalarda karbüratörlü motorlarda maksimum güçte ancak % 3-5 mertebelerinde bir azalma görülmektedir.

Benzin püskürtmeli ve elektronik kontrol sistemli motorlarda ise güç düşüşü tamamen önlenmektedir. Diğer taraftan LPG'nin daha yüksek oktan sayısına

sahip olması nedeniyle, yeniden tasarlanacak motorlarda sıkıştırma oranının yüksek tutulması da motor gücünün artırılmasına olanak tanıyacaktır.

Taşıtlarda da kullanılabilen petrol gazının önemli bölümünü propan oluşturur. Propanın egzoz emisyonları düşük ve yüksek oktan sayısına sahiptir. En önemli üstünlüklerinden birisi metana göre daha kolay sıvılaştırılabilmesidir. Örneğin 21 °C sıcaklıktaki 110 Pa basınç altında sıvılaştırılabilmektedir. Bu özelliği nedeni ile daha kolay sıvılaştırılarak depolanabilmektedir.

Sıkıştırılmış petrol gazı, yüksek basınç altında saklanır. Sıvılaştırılmış petrol gazının oktan sayısı 103-105'dir. Oktan sayısının yüksek olmasına rağmen enerji yoğunluğu petrole göre, kütleli olarak %11, hacimsel olarak %33 daha azdır. Setan sayısı düşük olduğu için dizel motorlarında kullanılmaya uygun değildir.

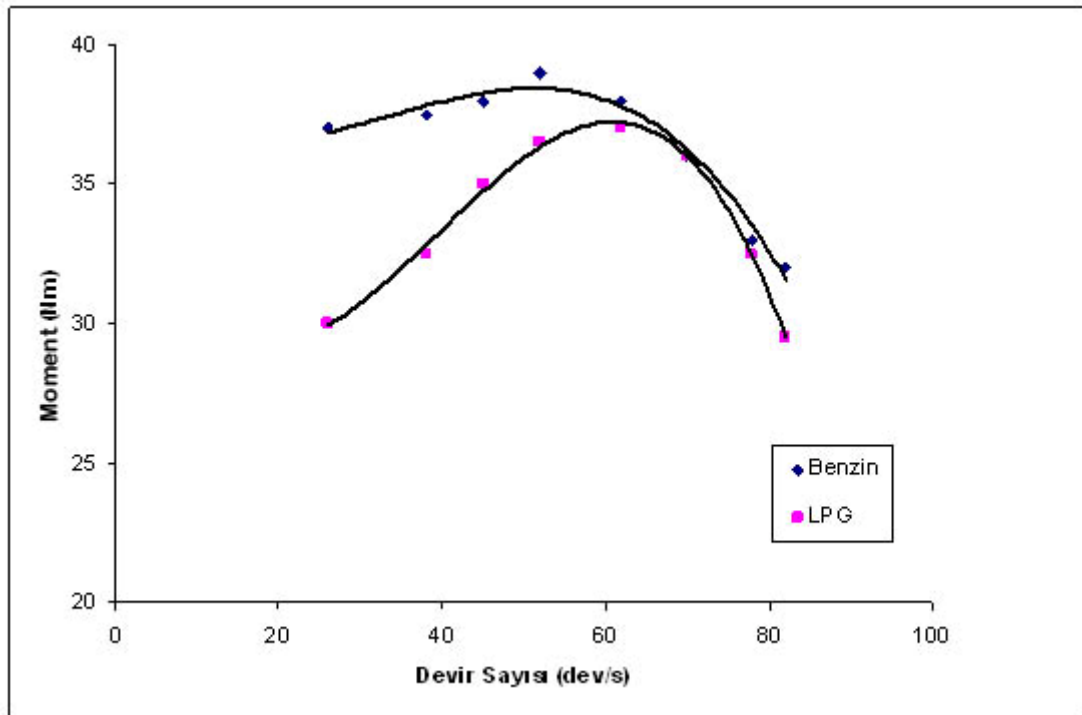
Sıvı yakıt yerine gaz kullanıldığında, emilen karışım içinde gaz yakıt daha fazla hacim kapladığından, volümetrik verim ve güç belirgin olarak düşer. Bu güç kaybı 103-105 gibi yüksek oktan sayısına uygun olarak dizayn edilmiş motorlarda giderilebilir.

Aşağıda alternatif yakıt olarak LPG'nin kullanıldığı Reliant marka 850 cm<sup>3</sup> motor hacimli 4 silindirli 4 zamanlı karbüratörlü bir motor üzerine elektrik dinamometresi yerleştirilmiş ve 1. kuşak LPG dönüşüm sistemi ile LPG uygulaması yapılmış ve performans değerleri belirlenmiştir.<sup>(19)</sup>.

Motorun performansını belirlemek amacıyla motor tam açık gaz kelebeği konumunda çalıştırılmıştır. Performans değerlerinin belirlenmesi için hidrolik dinamometrenin terazisinden bu hızlarda motorun ürettiği moment değerleri okunurken, elektrikli dinamometrede ise motorun ürettiği moment terazisinden kuvvet olarak okunmaktadır. Bu değerler yardımıyla performans değerleri olarak

belirlenen motor momenti, efektif güç, efektif verim ve özgül yakıt tüketimi hesaplanmıştır. Hesaplanan bu değerler grafikler şeklinde sunulmuştur. Yapılan deneyler sonucunda elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir.

Moment, motorun iş yapabilme kabiliyetinin ölçüsüdür. Düşük hızlardan yüksek hızlara doğru motor hızının artmasıyla moment de artmaktadır. Moment bir maksimum noktadan geçtikten sonra azalmaktadır. Momentin azalmasının sebebi yüksek hızlarda doğru oranda karışım sağlayamaması ve volumetrik verimin devir sayısı arttıkça azalmasıdır<sup>(20,21)</sup>.



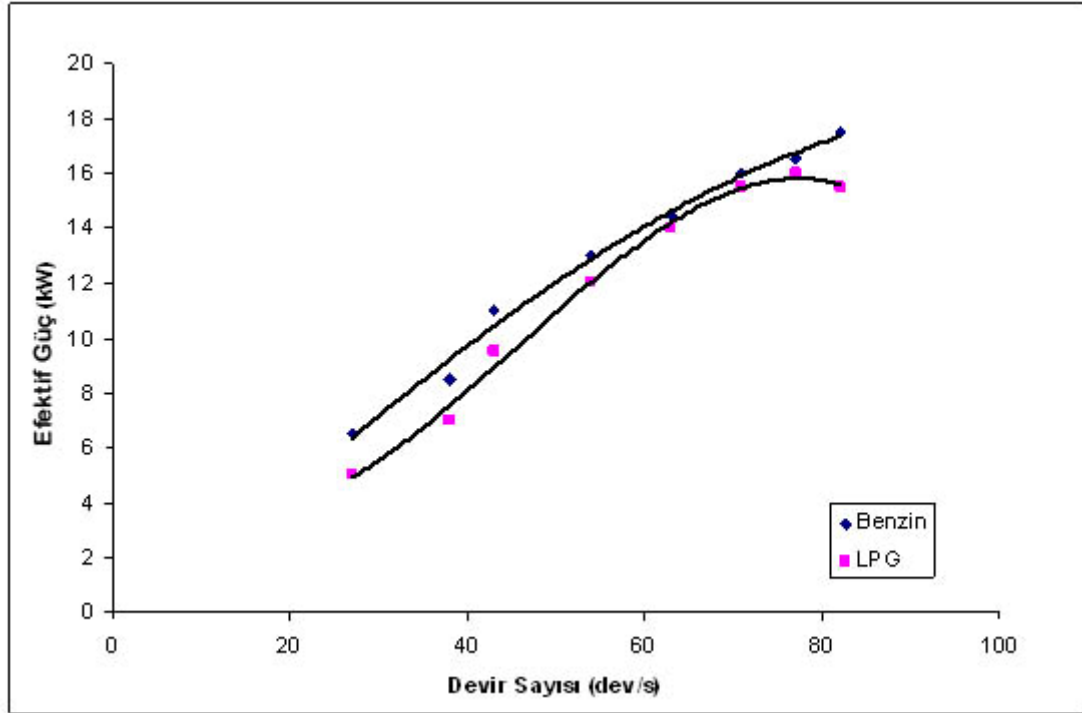
**Şekil 3.6.** LPG-Benzin kullanımında moment ve devir sayısı değişimi.

Deney motorunun tam açık gaz kelebeği konumunda devir sayısına bağlı olarak motor momentinin değişimi Şekil 3.6'de verilmiştir. Şekil 3.6 incelendiğinde



motorda LPG ile çalışmada moment değerlerinde ortalama %8'lik azalma olmaktadır. LPG'nin karbüratöre gaz fazında girmesi dolayısıyla volumetrik verimin düşük olması, düşük motor hızlarında silindirler içerisine giren hava hızı düşmesi ve karışım oranının bozulması ile motor momentinde azalma olmaktadır.

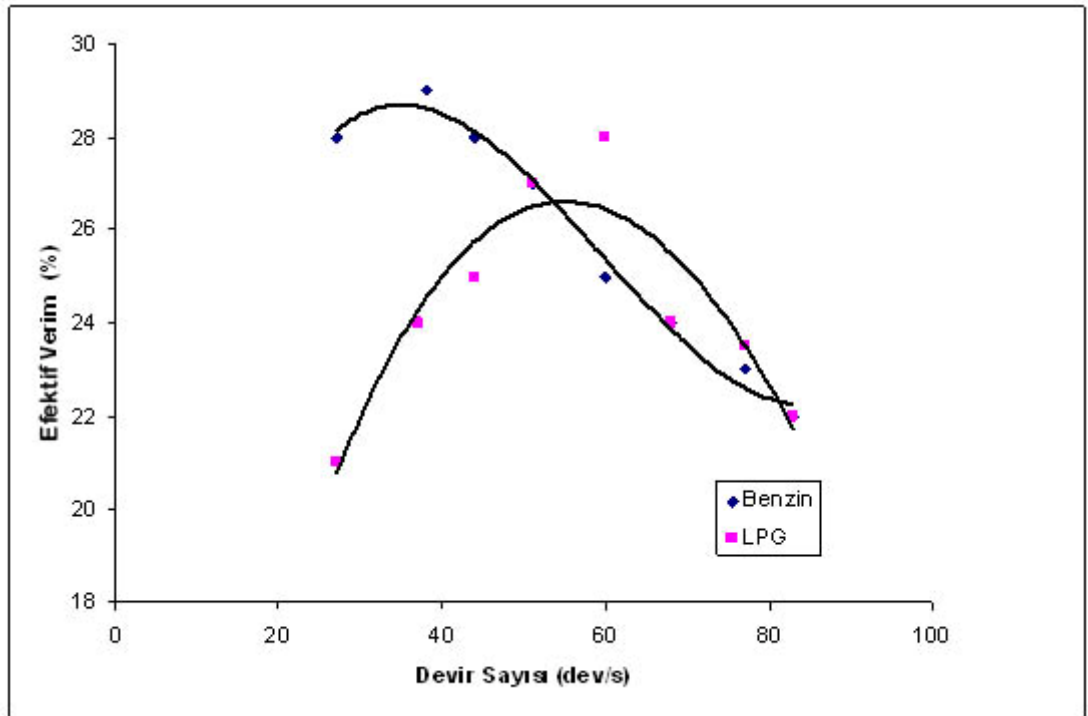
Efektif güç motor hızının bir fonksiyonudur. Efektif güç, artan devir sayısına bağlı olarak artar. Maksimum efektif güce maksimum motor momenti değerinden daha sonra ulaşılır <sup>(20,21)</sup>.



**Şekil 3.7.** LPG-Benzin kullanımında efektif güç ve devir sayısı değişimi.

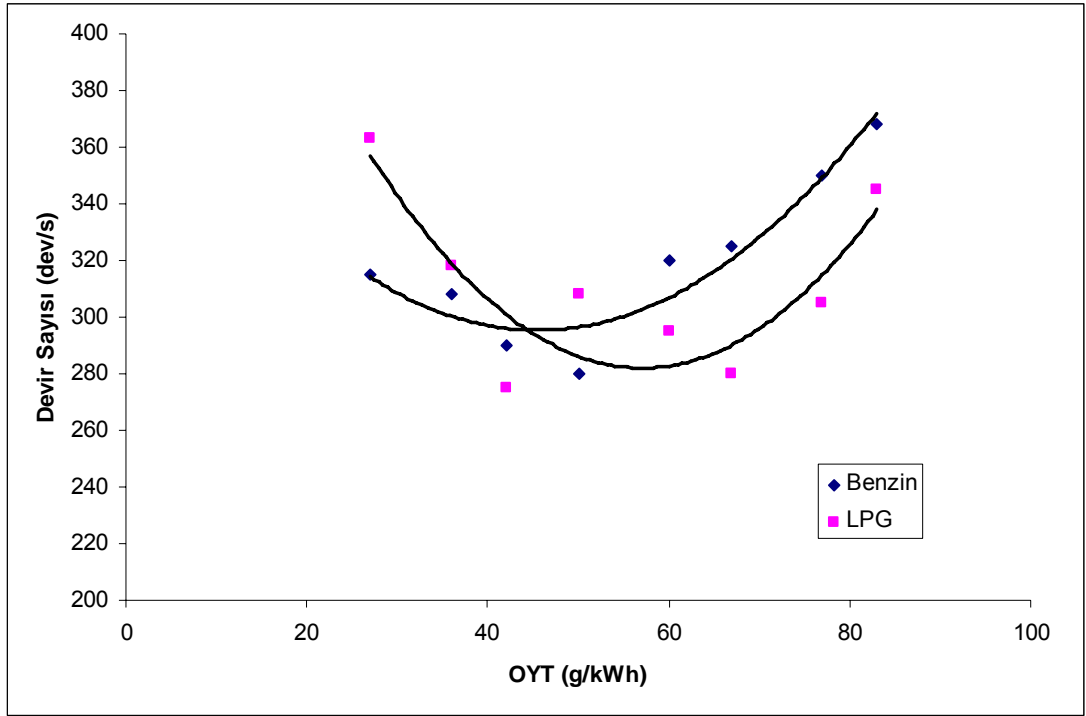
Motorların krank millerinden ölçülen moment değeri ile motor devir sayıları çarpılarak efektif güç hesaplanmıştır, motorun gücünde ortalama %8 azalma olmaktadır (Şekil 3.7).

Efektif verim için benzin ve LPG için grafiği aşağıda verilmektedir. Motorun LPG ile çalıŐtırılmasında efektif veriminin daha yüksek olduğu görülmektedir. Bunun sebebi, LPG'nin ısıl değerinin daha yüksek olması ve LPG'nin gaz yakıt olmasından dolayı daha homojen bir karışım oluŐturması ve daha verimli yanması olarak özetlenebilir.



**Şekil 3.8.**LPG-Benzin kullanımında efektif verim ve devir sayısı değerini.

Özgül yakıt tksetimi, motorlarda kullanılan yakıtın kimyasal enerjisinin ısı enerjisine dönüŐürken bu enerjinin ne kadarının krank milindeki güce dönüŐtürdüđünü gösteren değerdir. Efektif zgl yakıt tksetimi, aynı zamanda motorun efektif verimini belirleyen bir özelliktir <sup>(22)</sup>.



**Şekil 3.9.** LPG-Benzin kullanımında Özgül yakıt tüketimi ve devir sayısı değişimi.

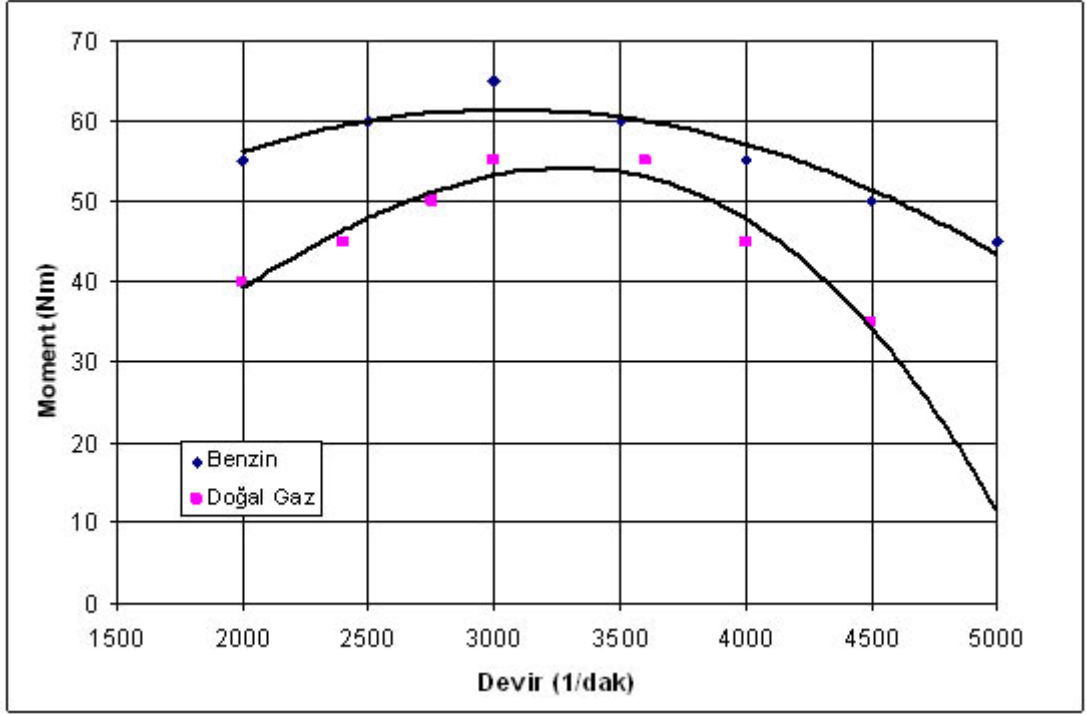
Efektif özgül yakıt tüketimi grafiği incelendiğinde artan devir sayısı ile birlikte azalmakta, bir minimumdan geçtikten sonra, artan devir sayısı ile artan sürtünme kuvvetleri ve soğutucuya olan ısı transferinin azalmasından dolayı, tekrar artmaktadır. Efektif özgül yakıt tüketimi grafiği incelendiğinde, motorun LPG ile çalışmasında külesel olarak daha az yakıt tükettiği görülmektedir. Bunun sebebi, LPG'nin alt ısıl değerinin benzinin ısıl değerine göre daha yüksek olmasıdır. LPG'nin yanması sonucunda daha fazla ısı enerjisi ortaya çıkmakta ve krank milinden 1 kWh'lik enerji almak için daha az yakıt tüketilmektedir.

### 3.2.2. Benzin ve CNG Kullanılan Motorlarda Performans Karşılaştırması

Benzin ve doğalgazla çalışmalardaki motor momentlerinin devir sayısına bağlı değişimleri Şekil 3.10' de, gösterilmiştir. Doğalgazla çalışmada elde edilen moment değerleri, benzinle çalışmada elde edilen değerlerin altında kalmıştır. Benzinle yapılan denemede moment 3000 l/dak. 'e kadar sürekli yükselmiş, bu devirde 64,13 Nm ile maksimum değerine ulaşmış ve sonra düşmeye başlamıştır. Doğalgazla yapılan denemede ise, moment 3400 l/dak. 'e kadar yükselmiş, bu devirde 62,13 Nm ile maksimum değerine ulaşmış ve sonra düşmeye başlamıştır. Doğalgazla çalışmada meydana gelen düşüş benzinliye oranla biraz daha hızlı olmuştur.

Benzin ve doğalgazla çalışmayla ilgili motor gücü eğrileri, Şekil 3.11'de gösterilmiştir. doğalgazla çalışmada elde edilen güç eğrisi, benzinle çalışmada elde edilenin altında kalmıştır. Motor gücü, benzinle çalışmada 4500 l/dak.'e kadar sürekli artış gösterirken, doğalgazla yapılan denemede 3400 l/dak 'e kadar artmış, bu devirden sonra azalmıştır. Doğalgazla çalışmada maksimum güç, 3400 l/dak 'de 22,122 kW, benzin ile çalışmada 4500 l/dak 'de 23,42 kw olarak belirlenmiştir.

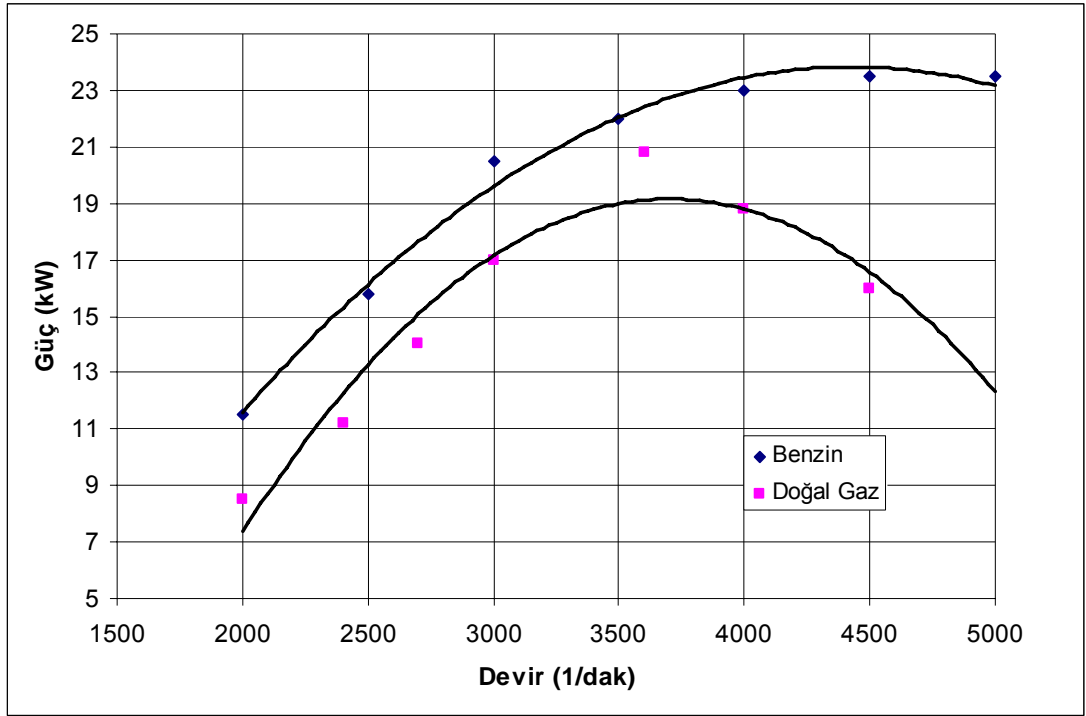
Aşağıda alternatif yakıt olarak CNG' nin kullanıldığı Murat 124 marka buji ateşlemeli, dört zamanlı bir motor kullanılarak; doğalgazın motorların performansına etkisi değerlendirilmiştir. Doğal gazın oktan sayısının yüksek olmasından dolayı, tasarımın müsaade ettiği ölçüde motorun sıkıştırma oranını artırmak ve daha yüksek verim almak düşüncesiyle, motorun silindir kapağında motor kataloğunda müsaade edilen maksimum miktar olan 1 mm talaş kaldırılarak sıkıştırma oranında 0,9/1 kadar artış sağlanmıştır. <sup>(23)</sup>.



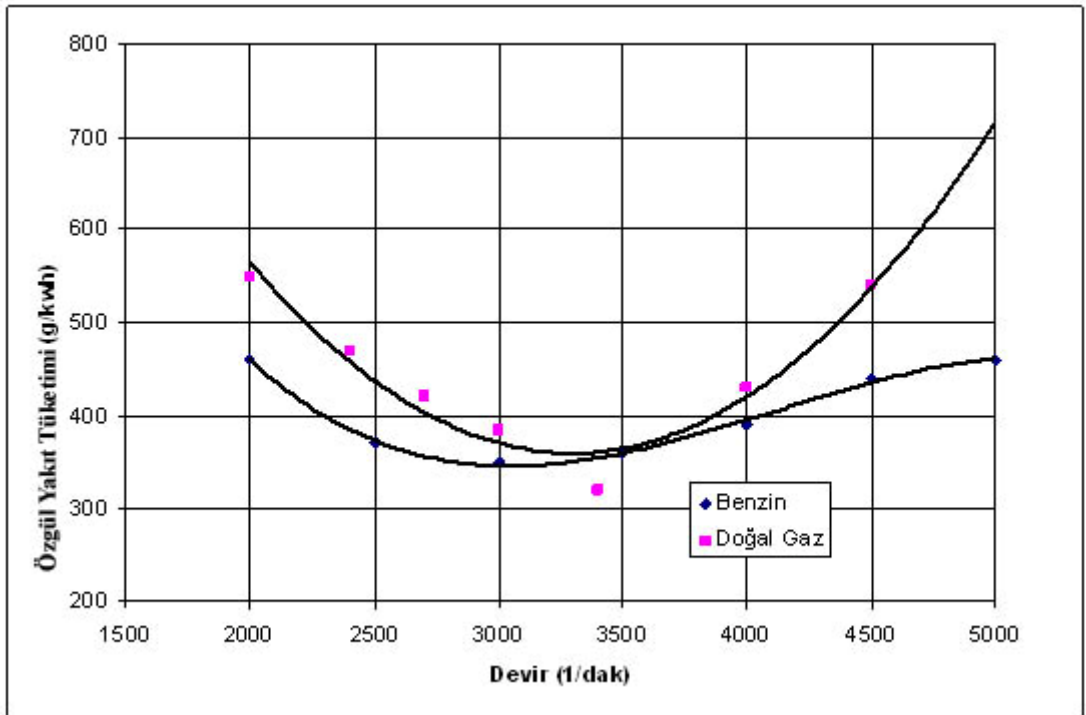
**Şekil 3.10.** Benzin ve CNG ile çalışmada motor momenti ve motor devri ilişkisi

Benzin ve doğalgazla çalışmayla ilgili özgül yakıt tüketimi eğrileri Şekil 3.12’de gösterilmiştir. Doğalgazla çalışmada elde edilen özgül yakıt tüketimi eğrisi, 3400 1/dak. motor devri dışında, benzinle çalışmada elde edilen özgül yakıt tüketimi eğrisinin üzerinde kalmıştır. Minimum özgül yakıt tüketimi, doğalgazla çalışmada 3400 1/dak’ de 320,9 g/kWh, benzinle çalışmada, 3000 1/dak’ de 342,87 g/kWh olarak belirlenmiştir.

Minimum özgül yakıt tüketiminin elde edildiği devirden uzaklaşıldıkça, motorun doğalgazla çalışmadaki ekonomisi benzinle çalışmaya oranla bundan daha olumsuz etkilenmiştir.

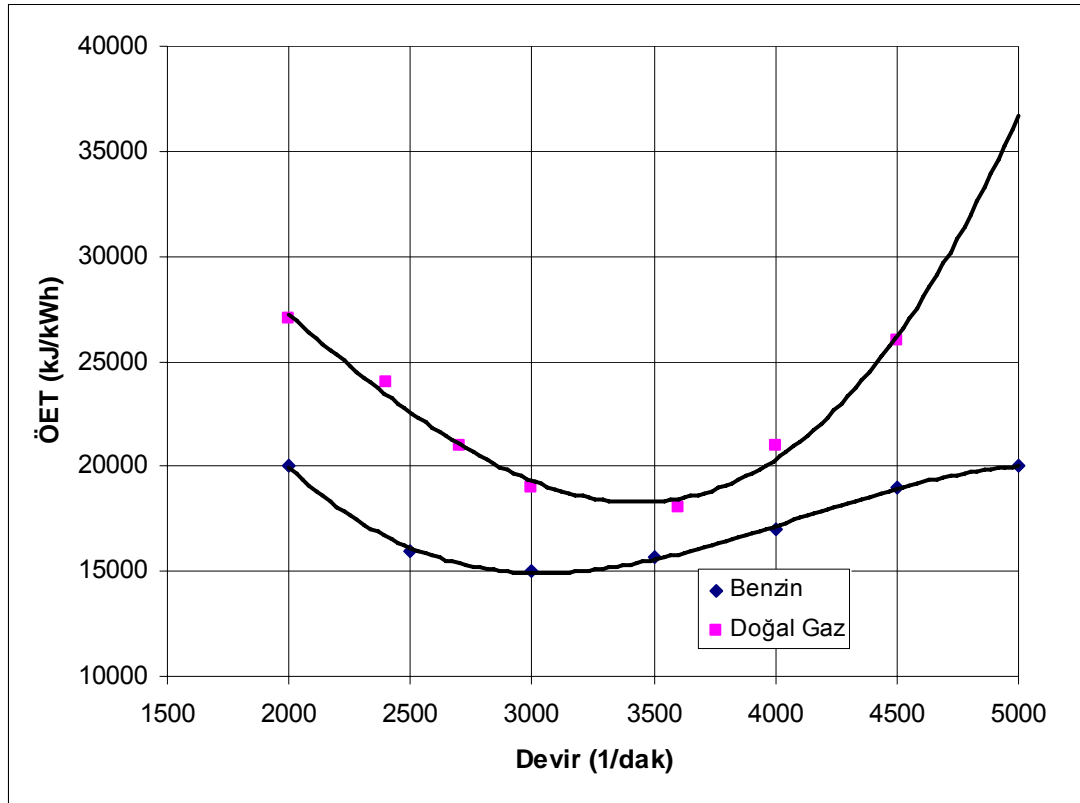


Şekil 3.11. Benzin ve CNG ile çalışmada motor gücü ve motor devri ilişkisi



Şekil 3.12. Benzin ve CNG ile çalışmada özgül yakıt tüketimi ve motor devri ilişkisi

Doğalgaz ve benzinle çalışmayla ilgili özgül enerji tüketimi eğrileri Şekil 3.13’de gösterilmiştir, doğalgazla çalışmada elde edilen özgül enerji tüketimi eğrisi benzinle çalışmada elde edilen özgül enerji tüketimi eğrisinin üzerinde kalmıştır. Benzinle yapılan deneylerde minimum özgül enerji tüketimi 3000 1/dak’ de 14941 kJ/kWh iken, doğalgazla çalışmada 3400 1/dak’ de 15885 kJ/kWh olarak belirlenmiştir.



Şekil 3.13. Benzin ve CNG ile çalışmada özgül enerji tüketimi ve motor devri ilişkisi

#### 4. SONUÇ

Yapılan çalışmada, benzinli motorların alternatif yakıtlar kullanılması durumunda motorun performans özelliklerinin parametrelerinin karşılaştırmalı olarak incelenmesi amaçlanmıştır. Günümüz taşıt motorlarında LPG, CNG ve hidrojenin alternatif yakıt olarak kullanılması halinde motorun gösterdiği performans karakteristikleri genel olarak egzoz emisyon ve performans açısından avantaj ve dezavantajlar sergilemektedir. Yapılan çalışmada değerlendirilen deney sonuçları doğrultusunda, alternatif yakıtların motor performansına etkileri açısından aşağıdaki hususlar öne çıkmaktadır.

LPG gaz yakıt olduğundan dolayı motorun hava emme kapasitesinde bir azalma olması nedeniyle volümetrik verim düşmektedir. Bunun sonucunda ise LPG ile çalışmada, kurşunsuz benzinle çalışmaya kıyasla daha düşük motor momenti ve efektif güç değerleri elde edilmektedir. Ancak, LPG'nin alt ısıl değerinin kurşunsuz benzinden daha yüksek olmasından ve LPG'nin silindir içinde daha homojen karışım oluşturmasından dolayı LPG ile çalışmada efektif verimi daha yüksek olmaktadır. Yine LPG'nin alt ısıl değerinin benzinden daha yüksek olmasından dolayı özgül yakıt tüketimi daha düşük olmaktadır.

LPG'nin alternatif yakıt olarak kullanıldığı benzinli motorlardaki hava-yakıt oranlarının aşırı değişimi gözlemlenmiştir. LPG dönüşüm sistemlerinin çalışma esası durumlarına göre, istenilen karışım oranlarının elde edilmesi değişim göstermektedir.



Sıkıştırılmış doğal gaz (CNG), gelecekte taşıtların enerji ihtiyacını büyük oranda karşılayabilecek olan çevreci ve önemli bir alternatif yakıt olarak görülmektedir. Deneysel çalışmalar doğal gazın hem buji ile ateşlemeli hemde sıkıştırma ile ateşlemeli motorlarda önemli modifikasyonları gerektirmeksizin ve dikkate değer performans kaybına yol açmaksızın kullanılabileceğini göstermiştir. Bu aşamada, doğal gazın motor yakıtı olarak daha yaygın bir biçimde kullanılmasının önündeki en önemli olumsuzluklar, gerek kullanım öncesindeki ve gerekse taşıttaki depolama güçlükleri ile servis ağının ülkemiz genelinde yaygınlaşmamış olmasıdır.

Doğal gaz, yakıt temini ve depolama problemlerinin çözümü ve sülfürlü bileşiklerinden de arıtılması halinde, petrolün yerini doldurabilecek önemli bir alternatif yakıttır. Doğal gazın özgül enerji maliyetinin düşük olması, ekonomik yönden yakıt olarak çok cazip hale getirmektedir.

Benzin motorunun doğal gazla çalıştırılması halinde benzinle çalışmasına göre, maksimum motor momenti % 3, maksimum motor gücü de %6 kadar azalmıştır. Motor momenti ve gücündeki azalmanın nedeni doğal gazın yanma hızının düşük olması olarak açıklanabilir. Bunun yanında doğal gazın oktan sayısının yüksek olması nedeniyle, sıkıştırma oranı artırılarak motor performansını artırmak mümkün olmaktadır. Doğal gazın oktan sayısının benzinin oktan sayısından çarpıcı derecede yüksek oluşu, sıkıştırma oranının artırılarak aynı hacimli benzin motoruna

göre daha fazla güç alınabilmesine imkan vermektedir. Benzinli motorlarda kullanılması halinde; stokiyometrik karışımlarla en avantajlı ateşleme avansı benzinle çalışmaya oranla 2° kadar fazla olduğu ve 15/1 sıkıştırma oranında en yüksek indike ısı verim sağlandığından, kullanılan motorun sıkıştırma oranının artırılabilmesi performans değerlerinde artış sağlayacaktır.

Ayrıca, doğal gazın ekonomikliği göz önüne alındığında diğer yakıtlara ve özellikle benzine göre kayda değer bir avantajı söz konusudur. Bunun yanı sıra doğal gaz; oktan sayısının yüksek olmasından dolayı motor yanma verimi açısından daha uygun bir yakıttır. Doğal gazın tutuşma sıcaklığı 650 °C, benzininki ise yaklaşık 350 °C dir. Bu açıdan değerlendirildiğinde doğal gaz motor yağı ömrünü uzatmaktadır. Doğal gazda, diğer yakıtlarda olduğu gibi katkı maddeleri bulunmadığı için, yanma sonrası motorda daha az atık madde bırakacağından dolayı motor ömrünün uzamasına da etki etmektedir. Yine motora direkt gaz olarak gireceğinden dolayı soğuk havalarda dahi kolayca yanma sağlayacağından da bahsetmek mümkündür.

Doğal gazın taşıtlarda yaygın olarak kullanılabilmesi, sistemin avantajlarının araç sahiplerine tanıtılmasına, dönüşüm işlemlerinin teşvik edilmesine ve dolmuş istasyonlarıyla servis ağının ülke genelinde yaygınlaşmasına bağlıdır.

Hidrojen, taşıt ve işletme maliyeti, depolanması, üretimi, sürüş menzili, yakıt ikmal altyapısı, tahrik sisteminin özgül gücü, tahrik sisteminin verimi, düşük emisyon özelliği ve yakıtın yenilenebilirlik özelliği olmak üzere birçok konuda incelenebilir. Bu başlıklar altında bakıldığında hidrojen, eldesi ve üretimi, yakıt ikmal altyapısı ve alternatif yakıt olarak kullanılabilmesi için motorda gereken modifikasyonlar, diğer yakıtlara göre günümüzde kullanılabilirliği çok iç açıcı konumda değildir. Hidrojenin gaz halde kullanılması durumunda, diğer yakıtlardan, motor performansı açısından yüksek değerler elde edilmiştir. Ayrıca hidrojenin yenilenebilirlik özelliği göstermesi bu teknoloji üzerine yapılan yatırımların gerekliliğini ortaya koymaktadır.

Çevreci bir yakıt olarak hidrojenin emisyon karakteristikleri de bu konuda oldukça önem gerektiren bir konudur. Ancak bunlara tezat olarak, hidrojenin yakıt olarak kullanılması kısa vadede mümkün görülmemektedir. Bunun en önemli nedenleri ise maliyetler ve hareketliliğin devamı için hidrojenin ikmal istasyonlarının yaygınlaşması gerektiğidir. Bu sebeple hidrojen günümüzde ancak mevcut yakıtı zenginleştirmede kullanılabilir vaziyettedir.

## KAYNAKLAR

1. M. Tekin, Y. Çavuşoğlu, Bir Dizel Motorunun Doğalgazlıya Dönüşümü, 1. Uluslararası Katılımlı Otomotiv Teknolojisi Kongresi, 103, Adana, 1997.
2. O. A. Albay, Fakir Karışımli Benzin Motorlarında Hidrojen veya Doğalgazın Ek Yakıt Olarak Kullanılması, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 1993.
3. B. Alderson, Australian Energy News, 10, 1998
4. P. Gandhidasan, A. Ertas, E. E. Anderson, Journal of Energy Resources Technology, **113**, 101, (1991).
5. A.Keskin, Buji İle Ateşlemeli Bir Motorun Doğalgazlıya Dönüşümünün Performans ve Emisyonlara Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Dumlupınar Üniversitesi, Kütahya, 1997.
6. N. Öncül, Bilim ve Teknik Dergisi, **Temmuz 1990**, 6, 1990.
7. ABCs of AFVs A Guide to Alternatif Fuel Vehicles, 5th Edition, California Energy Commission, 1999.
8. D. J. Holt, Automotive Engineering, **90**, 133, 1982.
9. H. Menrad, R. Wegener, H. Loeck, Society of Automotive Engineers, 1, 1985.
10. B. M. Çeviköz, Alternatif Motor Yakıtları ve LPG'nin Motor Yakıtı Olarak Benzinle Deneysel Olarak Karşılaştırılması, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 1996.

11. Araçlarda LPG Dönüşümü Mühendis El Kitabı, TMMOB Makine Mühendisleri Odası Yayınları, Ankara, 2000.
12. Lovato Üretim Kataloğu, İtalya, 1996.
13. B. Safgönül, M. Ergeneman, C. Soruşbay, H. E. Arslan, T. Özaktaş, İstanbul Teknik Üniversitesi Araştırma Fonu, 90 K120670/12, İstanbul 1994.
14. R. Harmon, Mechanical Engineering, **March 1992**, 58, (1992).
15. C. Soruşbay, H. E. Arslan, Mühendis ve Makina Dergisi, **339**, 15, 1988.
16. Z. D. Ristovski, E. R. Jayaratne, L. Marowska, G. A. Ayoko, M. Lim, Science of the Total Environment, 2004.
17. M. P. Hekkert, F. H. J. F. Hendriks, A. P. C. Faaije, M. L. Neelis, Energy Policy, **33**, 2005.
18. H. Bayraktar, O. Durgun, Buji Ateşlemeli Motorlarda Gaz Yakıtların Kullanılmasının Yanma ve Motor Performansı Üzerindeki Etkileri, 6. Yanma Sempozyumu, 273, İstanbul, 1998.
19. H. Bayraktar, O. Durgun, Buji Ateşlemeli Motorlarda LPG Kullanımının Teorik İncelenmesi, 1. Ege Enerji Sempozyumu ve Sergisi, 273, Denizli, 2003.
20. H. Bayraktar, O. Durgun, Mühendis ve Makine Dergisi, **533**, 2004.
21. H. S. Yücesu, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, **11**, **4**, 675, Ankara, 1998.

22. K. Kındıroğlu, M. Demirsoy, N. S. Kuralay, Makine Magazin Dergisi Ekim Sayısı, 20, 1996.
23. The International Association for Natural Gas Vehicles of Auckland, New Zealand, 2000.
24. N. Dinler, N. Yücel, Alternatif Yakıt Olarak LPG Kullanan İki Motorun Performansının Deneysel İncelenmesi, LPG ve CNG Uygulamaları Sempozyumu, Ankara, 2002
25. J. B. Heywood, Internal Combustion Engine Fundamentals, McGraw-Hill Inc. , Newyork, 1988.
26. W. W. Pulkrabek, Engineering Fundamentals of the Internal Combustion Engine, Prentice Hall, U.S.A, 1997.
27. O. A. Kutlar, M. Ergeneman, H. Arslan, M. Mutlu, Taşıt Egzozundan Kaynaklanan Kirleticiler, Birsen Yayınevi, İstanbul, 1998.
28. S. Çetinkaya, Tesisat Mühendisliği Dergisi, **81**, 14, 2004.
29. E. Oral, V. Çelik, Mühendis ve Makine, **46**, **540**, 30, 2004.
30. C. V. Collet, A. D. Hope, Engineering Measurements, Pitman Book Limited, Second Edition, Massachussets, 1983.
31. O. Durgun, Motorlarda Deneysel Yöntemler, Karadeniz Teknik Üniversitesi, 1995