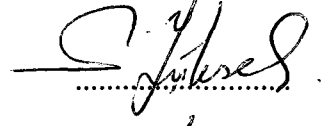


JURİ ÜYELERİ

Prof.Dr.Bedri YÜKSEL



Yrd.Doç.Dr.Kadir BİLEN



Yrd.Doç.Dr.Fikret YÜKSEL



01.09.2000 tarihinde 18/160 kararla kurulan jürimiz iş bu Y.Lisans
tezini 29.09.2000 tarihinde kabul etmiştir.

**TC. YÜKSEKÖĞRETİM BAKANLIĞI
DOKÜMANTASYON MERKEZİ**

ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ALTERNATİF YAKIT OLARAK HİDROJEN-BENZİN
KARIŞIMLARININ BENZİN MOTORLARINDA KULLANIMI

Mehmet Akif CEVİZ

Yönetici: Yrd. Doç. Dr. Fikret YÜKSEL

9/11/13

Yüksek Lisans Tezi

ÖZET

Günümüzde dünya enerji ihtiyacının büyük kısmı fosil yakıtlardan (petrol, doğalgaz kömür gibi) karşılanmaktadır. Ancak, fosil yakıtların giderek azalması ve çevresel kaygılar bir çok mühendis ve bilim adamını temiz, yenilenebilir ve yeterli enerji sistemleri geliştirmek üzere çalışmaya sevk etmiştir. Bu yeni ve yenilenebilir temiz enerji kaynakları içerisinde genel olarak, gelecekte hidrojenin enerji taşıyıcı olarak kullanılacağı konusunda araştırmacılar hemfikirdirler.

İçten yanmalı motorlarda yakıt olarak hidrojenin kullanılması yeni bir fikir değildir ve taşıma sektöründe kullanımını geliştirmek üzere bir çok çalışmalar yapılmıştır. Ancak, hidrojen mükemmel bir yakıt olmasına rağmen yaygın kullanımını engelleyen çeşitli sorunlar mevcuttur. Bunlar içerisinde, hidrojenin mobil sistemler üzerinde taşınması ve geri yanma, erken tutuşma ve hızlı basınç artışı gibi istenmeyen yanma olayları ana problemlerdir.

Günümüze kadar bir çok araştırmacı hidrojenin ikili yakıt olarak diğer yakıtlarla birlikte, değişik yöntemlerle kullanılması konusunda birçok çalışmalar yapmışlardır. Hidrojenin diğer yakıtlarla az ve kontrol edilebilir miktarlarda karıştırılması ile bir çok avantaj sağlanmaktadır.

Bu çalışmada, konvansiyonel elektronik kontrollü, dört silindirli ve dört stroklu bir benzin motoru hidrojen ilavesi ile ikili yakıt prensibine göre çalıştırılmak üzere düzenlenmiştir. Çalışmanın asıl amacı, çeşitli çalışma şartları altında hidrojen ve benzinin optimum karışım oranlarını belirlemektir.

SUMMARY

Fossil fuels (i.e. Petroleum, natural gas and coal) meet most of the world energy demand today. However, depletion of fossil fuels and environmental considerations have led engineers and scientists to anticipate the need to develop a clean, renewable and sustainable energy system. In general, they agree that in such system hydrogen will be used as an energy carrier.

The use of hydrogen as a fuel for internal combustion engines is not novel and there was also extensive work in the development of it for surface transportation sector. Although hydrogen is an excellent fuel, there are still some difficulties for common use of it. The main difficulties are storage in mobile systems and some undesirable combustion problems such as backfire, preignition and rapid rate of pressure rise.

A number of researchers have investigated the possibility of combining hydrogen with other fuels in dual-fuel applications. There are a number of advantages of using hydrogen in small controllable amounts with other fuels.

In this work, a conventional electronically controlled, four-cylinder and four-stroke gasoline engine has been converted to work on the dual-fuel principle with hydrogen as the inducted fuel. The main objective of the investigation is to determine the optimum proportions between hydrogen and gasoline under various engine operating conditions.

TEŞEKKÜR

Konunun belirlenmesinde, literatür temininde ve çalışmalarım sırasında yönlendirmelerinden dolayı, kıymetli hocam Yrd. Doç. Dr. Fikret YÜKSEL'e teşekkürlerimi sunarım.

Literatür temininde yardımlarını esirgemeyen, bilgilerine başvurduğumda beni dinleme nezaketini gösteren ve fikirleri ile çalışmalarım katkıda bulunan değerli hocam Prof. Dr. Bedri YÜKSEL'e teşekkür ederim.

Çalışmalarım sırasında yurtdışında bulunan kıymetli hocam Yrd. Doç. Dr. Kadir BİLEN'e literatür temininde gösterdiği yardımlardan dolayı teşekkür ederim.

Çalışmalarımda kullandığım hidrojenin temininde yardımlarını esirgemeyen fakültemiz Kimya Mühendisliği Bölüm Başkanı Prof. Dr. Hanifi SARAÇ ve Doğu Yağ Sanayi Ticaret ve Anonim Şirketi yöneticisi Resai Çevik Bey'lere teşekkürlerimi sunarım.

Katkılarından dolayı bölümümüz teknikeri Sedat KOTAN'a teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

| | <u>Sayfa</u> |
|---|--------------|
| ÖZET | i |
| SUMMARY | ii |
| TEŞEKKÜR..... | iii |
| İÇİNDEKİLER | iv |
| SEMBOLLER..... | vi |
| 1. GİRİŞ | 1 |
| 2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR SIRASINDA KULLANILAN MATERYALLER ve YÖNTEMLER | 11 |
| 2.1. Deneylede Kullanılan Materyaller ve Yöntemler | 11 |
| 2.1.1. Hidrojen | 11 |
| 2.1.1.a. Hidrojenin Fizikokimyasal Özellikleri | 11 |
| 2.1.1.b. Üretim Yöntemleri | 14 |
| 2.1.1.c. Depolama Yöntemleri | 16 |
| 2.1.2. Benzin | 17 |
| 2.1.3. Motor | 21 |
| 2.2. Deney Düzenegi ve Kullanılan Ölçü Aletleri | 22 |
| 2.2.1. Güç Ölçüm Ünitesi (Hidrolik Fren) | 24 |
| 2.2.2. Yakıt Tüketimi Ölçüm Düzenegi | 25 |
| 2.2.2.a. Ölçüm Düzenegi | 25 |
| 2.2.2.b. Ağırlık Kontrol Ünitesi | 25 |
| 2.2.2.c. Kontrol ve Gösterge Ünitesi | 26 |
| 2.2.3. Hava Tüketimi Ölçüm Cihazı | 27 |
| 2.2.4. Egzoz Emisyon Cihazı | 28 |
| 2.2.5. Egzoz Gaz Kalorimetresi | 28 |
| 2.2.6. Soğutucu Akışkan Akış Ölçeri | 29 |
| 2.2.7. Hidrojen Akış Ölçeri | 30 |
| 2.3. Deneysel Verilerin Değerlendirilmesinde Kullanılan Bağıntılar | 31 |
| 2.3.1. Efektif Güç, P_e (kW) | 31 |
| 2.3.2. Ortalama Efektif Basınç, P_{me} (Mpa)..... | 32 |

| | |
|---|----|
| 2.3.3. Saatlik Yakıt Tüketimi, B (kgY/h) | 33 |
| 2.3.4. Özgül Yakıt Tüketimi, b_e (g/kWh) | 33 |
| 2.3.5. Efektif Verim, η_e | 33 |
| 2.3.6. Hava-Yakıt Oranı | 34 |
| 2.3.7. Teorik Hava Miktarı | 34 |
| 2.3.8. Hava Fazlalık Katsayısı, α | 35 |
| 2.3.9. Volumetrik Verim, η_v | 36 |
| 2.3.10. Yakıt Enerjisi, Q_y (kW) | 36 |
| 2.3.11. Soğutma Suyu İle Atılan Enerji, Q_s (kW) | 37 |
| 2.3.12. Egzoz Gazları ile Atılan Enerji, Q_e (kW) | 37 |
| 2.3.13. Kayıp Enerji (Işınım ve sürtünmeler yoluyla kaybolan enerji), Q_k ... | 39 |
| 2.3.14. Enerji Dağılım Oranları | 39 |
| 2.4. Deneyin Yapılışı | 39 |
| 3. SONUÇLAR | 42 |
| 4. TARTIŞMA ve ÖNERİLER | 67 |
| KAYNAKLAR | 70 |

SEMBOLLER

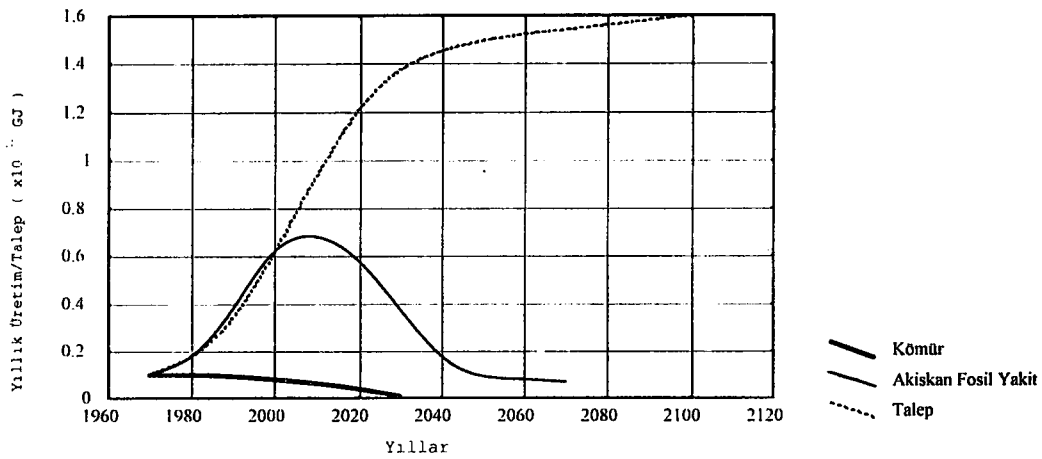
| | |
|-------------------|---|
| B | : Saatlik yakıt tüketimi, (kgY/h) |
| B _k | : Karışımın saatlik yakıt tüketimi, (kgY/h) |
| b _e | : Özgül yakıt tüketimi, (g/kWh) |
| c _{cg} | : Egzoz gazı özgül ısısı, (kJ/kgK) |
| c _s | : Soğutma suyu özgül ısısı, (kJ/kgK) |
| CO | : Karbonmonoksit, (% Hacim) |
| h | : Cıvalı manometreden okunan yükselti farkı, (mm-Su Sütunu) |
| HC | : Hidrokarbon, (ppm) |
| H _ü | : Alt ısı değer, (kJ/kg) |
| H _{ug} | : Benzinin alt ısı değeri, (kJ/kg) |
| H _{uh} | : Hidrojenin alt ısı değeri, (kJ/kg) |
| H _{uk} | : Karışımın alt ısı değeri, (kJ/kg) |
| M _d | : Döndürme momenti, (Nm) |
| m _{eg} | : Egzoz gazı debisi, (kg/sn) |
| m _g | : Birim sürede tüketilen benzin miktarı, (g/sn, kg/h) |
| m _h | : Birim sürede tüketilen hidrojen miktarı, (g/sn, kg/h) |
| m _{htg} | : Benzin için gerekli teorik hava miktarı, (kgH/kgY) |
| m _{hth} | : Hidrojen için gerekli teorik hava miktarı, (kgH/kgY) |
| m _{htk} | : Karışım için gerekli teorik hava miktarı, (kg H/kgY) |
| m _{htv} | : Volumetrik olarak gerekli hava miktarı, (kgH/kgY) |
| m _s | : Soğutma suyu debisi, (kg/sn) |
| m _{hava} | : Saatlik tüketilen hava miktarı, (kg/sn) |
| n | : Devir sayısı, (d/dak) |
| n _R | : Bir güç stroğu için gerekli dönme sayısı |
| O ₂ | : Oksijen, (% Hacim) |
| P _e | : Efektif güç, (kW) |
| P _{me} | : Ortalama efektif güç, (MPa) |
| T | : Sıcaklık, (°C) |
| T ₁ | : Ortam sıcaklığı, (°C) |
| T ₂ | : Yakıt sıcaklığı, (°C) |

- T_3 : Yağ sıcaklığı, ($^{\circ}\text{C}$)
- T_4 : Egzoz manifoldu sıcaklığı, ($^{\circ}\text{C}$)
- T_5 : Soğutucu akışkan giriş sıcaklığı, ($^{\circ}\text{C}$)
- T_6 : Soğutucu akışkan çıkış sıcaklığı, ($^{\circ}\text{C}$)
- T_7 : Egzoz gazı kalorimetre giriş sıcaklığı, ($^{\circ}\text{C}$)
- T_8 : Soğutma suyu kalorimetre giriş sıcaklığı, ($^{\circ}\text{C}$)
- T_9 : Egzoz gazı kalorimetre çıkış sıcaklığı, ($^{\circ}\text{C}$)
- T_{10} : Soğutma suyu kalorimetre çıkış sıcaklığı, ($^{\circ}\text{C}$)
- V_D : Toplam silindir hacmi, (cm^3)
- V_H : Toplam strok hacmi, (cm^3)
- Q_{eg} : Egzoz gazı ile atılan enerji, (kW)
- Q_k : Kayıp enerji, (kW)
- Q_s : Soğutma suyu ile atılan enerji, (kW)
- Q_y : Yakıt Enerjisi, (kW)
- α : Hava fazlalık katsayısı
- η_v : Volumetrik Verim
- η_e : Efektif verim
- ρ_g : Benzinin yoğunluğu, (g / cm^3)
- ρ_h : Hidrojenin yoğunluğu, (g / cm^3)
- ρ_{hava} : Havanın yoğunluğu, (g / cm^3)
- ρ_k : Karışımın yoğunluğu, (g / cm^3)

1. GİRİŞ

İçten yanmalı pistonlu motorların geçmişi, Nikolas August Otto'nun ilk kıvılcım ateşlemeli (benzinli) motoru yaptığı tarih olan 1876 ve Rudolf Diesel'in sıkıştırma ateşlemeli motoru geliştirdiği tarih olan 1892 yılına kadar uzanır [1,2]. Motor prosesi hakkındaki bilgi seviyesinin artması, yeni teknolojilerin geliştirilmesi, yeni motor tiplerine olan talebin artması ve motor kullanımı ile ilgili çevresel sınırlamaların değişmesine bağlı olarak içten yanmalı motorlar gelişimlerini sürdürmüşlerdir. İçten yanmalı pistonlu motorların kullanımı son yıllarda çok yoğunlaştığından hava kirliliği, gürültü ve petrol rezervlerinin azalması gibi sorunlar ortaya çıkmıştır [2].

Günümüzde enerji ihtiyacı da iki ana sebepten dolayı sürekli artmaktadır; birincisi dünya nüfusunun sürekli artması, ikincisi ise gelişmekte olan ülkelerin hayat standartlarını sürekli artırmak istemeleridir. Bugün dünya enerji ihtiyacının büyük kısmı fosil yakıtlardan (petrol, kömür ve doğalgaz) karşılanmaktadır. Şekil 1.1'de fosil yakıtların üretim hızı ve talebi konusunda yapılan tahminler yer almaktadır. Yapılan tahminler fosil yakıt üretim hızının giderek azalacağını göstermektedir. Kömür üretiminin de çevresel sebeplerden dolayı giderek azalacağı tahmin edilmektedir.



Şekil 1.1. Tahmini dünya fosil yakıt üretiminin yıllara göre dağılımı

Dünya nüfusunun yüzyıl sonunda 10-12 milyar olması beklenmektedir ve tüm bunların sonucu olarak da fosil yakıtların üretimi ve talebi arasında giderek artan bir açık meydana gelecektir.

Fosil kökenli yakıtların yanma ürünleri; greenhouse etkisi, ozon tabakası delinmesi, asit yağmurları ve kirlilik gibi global sorunlar doğurmaktadır. Bu sorunlar çevremiz ve dolayısı ile gezegenimizdeki hayat açısından tehlike arz etmektedir [3].

İçten yanmalı motorların kullanımındaki artışın sebeplerinden birisi de gaz, sıvı ve katı yakıtların kullanımına olanak sağlamasıdır [5]. Fosil kökenli yakıtların olumsuzluklarından dolayı bir çok araştırmacı, içten yanmalı motorların bu özelliğinden de faydalanarak çalışmalarını alternatif yakıtlar üzerinde yoğunlaştırmıştır. Alternatif bir yakıtın kullanılabilir kaynakları ve ürettiği kirletici emisyonlar; enerji koruma ve çevre açısından en önemli parametrelerdir. Bu parametrelerin yanı sıra alternatif yakıtın motor performansı üzerindeki etkileri ve depolama yöntemleri, motor ve araç teknolojisinde dikkate alınması gereken diğer özelliklerdir [4]. Benzin ve dizel yakıtlarına alternatif üretmek için pek çok çalışma yapılmıştır ve yapılmaya devam edilmektedir. Doğalgaz, metanol ve etanol (metil ve etil alkol) gibi petrol kökenli olmayan alternatif yakıtlara olan ilgi gittikçe artmaktadır. Bunun yanında sentetik benzin, dizel yakıtı ve hidrojenin içten yanmalı motorlarda yakıt olarak kullanımı konusunda dünyanın birçok yerinde çalışmalar sürdürülmektedir [1].

Bir çok mühendis ve bilim adamı, mevcut fosil yakıt sistemlerinin meydana getirdiği olumsuzlukların çözümünün, bu sistemlerin hidrojen enerji sistemleri ile yer değiştirmesi ile mümkün olabileceği konusunda hemfikirdedirler. Enerji kaynağı olarak hidrojen bir çok bakımdan yakıtlar içerisinde en iyisidir, çünkü zararlı egzoz gazları üretmez ve havada yandığında ana yanma ürünü sudur. Çok verimli ve temiz bir yakıt olan hidrojen greenhouse etkisi yapmaz, ozon tabakasına zarar vermez, asit yağmuru ve kirlilik oluşumuna sebep olmaz [3]. Fosil yakıtlar içerisinde kirliliğin asıl kaynağı benzindir, bundan dolayı hidrojenin kullanılacağı ilk alan da içten yanmalı motorlardır[6].

İçten yanmalı motorlarda hidrojenden faydalanılması fikri yeni değildir. Bu konuda ilk çalışmalar Reverend W. Cecil tarafından 1820 yılında yapılmıştır. Cecil çalışmasını "On the Application of Hydrogen Gas as a Moving Power in Machinery" başlığı ile Cambridge Philosophical Society'de sunmuştur [7]. 1854'lerde Benini İngiltere'de çeşitli çalışmalar yapmıştır. 1860-1870'lerde Otto muhtemelen % 50'den fazla hidrojen içeren sentetik gazlar denemiş, ancak ileriki dönemlerde karbüratörün gelişmesi ile benzinin hem pratik bir şekilde hem de güvenle kullanılacağı yeni bir dönem açıldığından, hidrojenle ilgili çalışmalar kesintiye uğramıştır [8].

I. Dünya savaşı sırasında hidrojenle uçurulan balonlar, savaştan sonra ise Graf, Zeplin gibi daha hafif hava araçları yapılmıştır [8]. Bu dönemde Alman mühendisi Rudolf Erren, Almanya ve İngiltere'de hidrojen veya hidrojen benzin karışımı ile çalışan binin üzerinde araç dönüşümü gerçekleştirmiştir. Erren, denizaltı, kamyon, otobüs, tren ve torpil gibi birçok sistemde hidrojen kullanımını sağlamış, ancak II. Dünya savaşı sırasında kayıtları kaybolmuştur. Savaş sonunda hidrojene olan ilgi giderek azalmakla birlikte R. O. King gibi araştırmacılar çalışmalarını sürdürmüşlerdir [7.8].

R. O. King ve laboratuvar arkadaşları, karbüratörlü bir hidrojen motorunun performansı üzerinde yoğun çalışmalar yapmışlardır. Çalışmaları sonunda: buji, egzoz valfi ve yanma odasındaki keskin çıkıntılar gibi sıcak noktaların erken yanma ve geri tutuşmaya yol açabileceğini belirtmişlerdir. Günümüz araştırmacıları da bu fenomenlerin sebepleri konusunda aynı fikre sahiptirler [7].

1970'lerde ortaya çıkan petrol krizi ve çevresel problemlerden dolayı hidrojen yakıtlı taşıma konusunda araştırmalar yeniden gündeme gelmiştir. A.B.D.'de UKLA ve Miami Üniversitesinde, Los Alamos, Billings ve General Motors gibi kuruluşlarda, Almanya'da Mercedes, DFVLR gibi kuruluşlarda, Japonya'da Musashi Enstitüsünde hidrojenin motorlarda kullanımı konusunda çalışmalar başlatılmıştır ve halen devam etmektedir [9]. Günümüzde Avrupa, Avustralya, Kanada, Japonya ve Birleşik Devletler gibi dünyanın birçok yerinde bu konu üzerinde yoğun çalışmalar yapılmaktadır [8].

Alternatif yakıt arayışı içerisinde bulunan bir çok araştırmacı, içten yanmalı motorlarda hidrojenin saf yakıt olarak kullanımının yanı sıra şimdiye kadar ikili yakıt uygulaması üzerinde de bir çok çalışma yapmıştır ve çalışmalar halen devam etmektedir. Hidrojenin çeşitli hidrokarbon yakıtlarla geniş karışım oranlarında çift yakıtlı motorda çalışabilme olanağına sahip olması, geçiş döneminde mevcut motorlarda önemli değişiklikler yapılmadan hidrojen kullanımını mümkün kılmaktadır [9]. Çift yakıt uygulaması için üzerinde durulan hidrojen, diğer yakıtlarla az miktarda karıştırıldığında bir çok avantaj sağlamaktadır.

Konvansiyonel hidrokarbon yakıtlı motorlarda yakıt içerisinde az miktarda hidrojen ilave edildiğinde, motorun termal veriminde artış sağlanmaktadır. Yüksek alev hızına sahip olan hidrojen ana yakıtın yanma süresini azaltır. Özellikle düşük ekivalans oranlarında çok daha etkin olan bu durum sayesinde daha iyi ivmelenme sağlanmaktadır [7].

Günümüzde kullanılan metal-hidrid hidrojen depolama sistemlerinden olan Fe-Ti formunda hidrojenin ağırlık yüzdesi % 2 olduğundan büyük miktarda hidrojen depolama ağırlığı ve bu sayede ölü ağırlığın artması sonucunda yakıt tüketiminde artış oluşur. Hidrojenin tek başına yakıt olarak kullanılması durumunda karşımıza çıkan bu teknik dezavantajın ortadan kaldırılması için hidrokarbon/hidrojen çift yakıt uygulaması kullanılabilir [10]. Ayrıca hidrojen soğukta yanma kabiliyeti iyi olmayan yakıtlarla birleştirildiğinde çeşitli avantajlar sağlayabilmektedir.

Ana hidrokarbon yakıtının hidrojenle zenginleştirilmesi fikri ilk olarak 1973 yılında Jet Propulsion Laboratory'de, Bresheas ve arkadaşları tarafından ortaya atılmıştır. Amaç motoru fakir karışımlarda çalıştırarak NO_x seviyesini düşürmektir. Fakir rejimde çalışma sonucunda NO_x seviyesi bir miktar düşürülmesine rağmen EPA1977 standartları yakalanamamıştır. Sebep olarak; 0.63'lük minimum ekivalans oranında kötü yanma gerçekleşmesi gösterilmiştir. Daha sonra ekivalans oranı 0.1'e düşürülmüş, Buna bağlı olarak ta NO_x miktarı EPA standartlarının 1/100'üne kadar düştüğü gözlenmiştir. Çalışmalarda termal verim % 20-50 civarında arttığı tespit edilmiştir. İlk deneyler bir

motor dinamometresi vasıtası ile daha sonrakiler ise bir yolcu aracı üzerinde gerçekleştirilmiştir [4].

May ve Gwinner; 1983 yılında, toplam hacmi 2.8lt olan, 6 silindirli, Daimler-Benz üretimi D-Jetronik yakıt enjeksiyonlu DBM110 tipi bir motorda hidrojen ve benzini elektromanyetik enjeksiyon jetleri ile sisteme vererek egzoz gaz emisyonları ve verim üzerinde çeşitli çalışmalar gerçekleştirmişlerdir. Rölanti ve çok düşük yükleme pozisyonlarında motorda, saf hidrojen, tam yük durumunda ise hidrojen-benzin karışımı kullanılmıştır. Çoğu zaman kısmi yükte çalışıldığı için motorda hidrojen-benzin karışımı çok daha fazla kullanılmıştır.

Hibrid (hidrojen-benzin karışımı) çalışma durumunda özellikle düşük ve kısmi yük şartlarında benzin motoruna göre daha yüksek termal verim ve daha az yakıt tüketimi sağlanmıştır. Bu durumun asıl sebebinin muhtemelen kelebeksiz ve aşırı hava ile deneylerin gerçekleştirilmesi olarak tahmin edilmektedir [10].

Povel ve arkadaşları, 1984'de, Mercedes-Benz'de hazırladıkları çeşitli prototip araçlarda hidrojen-benzin ikili yakıtlı motorlar kullanmışlardır. University of Kaiserslautern işbirliği ile yapılan bu çalışmalardan amaç, saf hidrojen ile çalışılmasından kaynaklanan zorluklardan uzaklaşarak hidrojenin pozitif yanma karakteristiklerinden faydalanmaktır. İlk çalışma ve rölanti durumunda saf hidrojen, kısmi yük durumunda hidrojen-benzin karışımı ve tam yükte ise saf benzin kullanılmıştır. Çalışmalarında; hidrojenin aşırı hava ile kullanılabilmesi özelliğinden dolayı NO_x miktarı ile yakıt tüketiminde azalma olduğu, buna karşın motorun termal veriminde artış olduğu görülmüştür [11].

Stebar ve Parks, 1974 yılında General Motors laboratuvarlarında bir CFR motoru ile 8:1 sıkıştırma oranında 1200 d/dak konumunda çeşitli deneyler yapmışlardır. Petrol yakıtı içerisine %10 hidrojen ilave ederek -ki bu durumda hidrojen enerji kesri β , %23 olur-ken ekivalans oranının alt limitinin 0.89-0.55 arasında değişmesi sağlanmış ve NO_x emisyonları 20 g/kWh'den 0.27 g/kWh'e düşürülmüştür. Kütleli olarak % 20 hidrojen

ilavesi ile ekivalans oranının alt limiti 0.4'e kadar düşürülmüştür. Motor gücü % 30 düşmüş, ancak termal verim, ekivalans oranı 1 iken % 33 ve 0.55 iken % 37 civarında artmıştır. CO emisyonlarında küçük bir artış görülmüştür. Ancak HC emisyonları artmıştır. 0.55'lik ekivalans oranında HC emisyonları minimum seviyesinden % 100 artış göstermiştir. Çok fakir karışımlarda sönmeye mesafesinin artması ve sönmüş hidrokarbonların art alev oksidasyonunun azalması yüzünden hidrokarbon emisyonları artmıştır [12].

General Motors laboratuvarlarında ayrıca tek ve çok silindirli motorlarda performans ve emisyon değerleri üzerinde çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Parks iki tip hidrojen ilaveli yakıtın emisyon karakteristiklerini düzenlemek üzere bazı çalışmalar yapmıştır. İlk yakıt çeşitli hidrojen-benzin oranlarındaydı ve deneyler hidrojen ilave edilen toplam yakıtın enerjisinde hidrojen enerji kesrini artırarak ultrafakir şartlarda hidrokarbon emisyonlarının azaltılıp azaltılamayacağı konusunda yoğunlaşmıştır. Fakat bu deneyler sonucunda hidrojen zenginleştirme yöntemi ile HC emisyonlarının yeterince azaltılamayacağı görülmüştür.

Araştırılan ikinci yakıt araç üzerinde bulunan bir hidrojen jeneratörü ürünü idi ve bu jeneratör benzini CO, H₂, CH₄ ve çeşitli diluent karışımlarına reforme edebilmekteydi. 0.55'lik ekivalans oranında çok daha az seviyede HC ve NO_x emisyonu oluşmuştur. Fakat iyi derecede karışım kontrol gereksinimi, benzinin hidrojen zengin karışımlara dönüştürülmesi sonucu kötüleşen yakıt ekonomisi, fazla miktarda diluent içeren gaz [?] *Turkey* yakıtların doğal emişli motorlarda güç kaybına yol açması gibi çeşitli engeller, sistemi sınırlamıştır [13].

Lucas ve Richards, 1982 yılında sıkıştırma oranı 8,9:1 ve 11,7:1 olan 1275 cm³ silindir hacimli ve 4 silindirli bir motor üzerinde çeşitli çalışmalar yapmışlardır. Rölanti hızını korumak için hidrojen debisi 69,5 mg/sn değerine set edilmiştir (850 d/dak). Hidrojen ilavesi sayesinde kısmi yük termal veriminde artış sağlanmış ve özgül yakıt tüketiminde % 30'lara varan düşüş gözlenmiştir. Soğutucu akışkana olan ısı kayıplarının ve pompa kayıplarının azaltılması sayesinde termal verim artmış, ancak hidrojenin hava ile yer değiştirmesi sayesinde volumetrik verimde ve buna bağlı olarak da maksimum güçte

düşüş olmuştur. Hidrojen ilavesi ile NO_x ve CO emisyonlarında azalma buna karşılık HC emisyonlarında çok düşük yüklerde büyük oranda artış gözlenmiştir [4].

Petkov ve Barzev, 1987 yılında enerji-ekoloji ilişkisi ile ilgili olarak içten yanmalı motorlarda hidrojen ilave teknikleri konusunda çeşitli çalışmalar gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışmalarını sonucunda; benzin ve havanın fizikokimyasal özelliklerine göre optimum hidrojen besleme sistemi dizaynının kaçınılmaz olduğu sonucuna varmışlardır. Matematiksel çalışmalarında hidrojen ilavesi teknikleri için gereksinim duyulan temel noktalar bulunmaktadır. Yaptıkları deneysel çalışmalar sonucunda; HC, CO ve aldehitler gibi kirleticilerin hidrojen ilavesi ile azaldığını, fakat azot oksit seviyesinin arttığını tespit etmişlerdir. Bunun muhtemel sebebi olarak da, daha iyi yanma sağlamak için oluşturulan karışım şartlarının olduğu öne sürülmüştür. Ateşleme zamanı ve yakıt enjeksiyon zamanının değiştirilmesi ve optimum su beslenmesi ile NO_x seviyesinde değişim gözlenmiştir [7].

Sheipak ve Kabalgin, 1990 yılında çeşitli kamyonları hidrojen-benzin ikili yakıt çalışmasına adapte etmişlerdir. Hidrojen metal-hidrid akümülatörlerden sağlanmış ve hidrojen ilavesi esnasında motor fakir karışımında çalıştırılmıştır. Bu durumda CO emisyonları 5-10 kat, NO_x emisyonları 2.5-8 kat aralığında azaltılmıştır [15].

Benzin-hidrojen ikili yakıt çalışmalarının yanı sıra benzin-hidrojen-etil alkol karışımıyla da çalışmalar yapılmıştır. Sadiq Al-Baghdadi ve Shahad Al-Jabani, 1998 yılında hidrojen ve etil alkol ilavesinin dört zamanlı kıvılcım ateşlemeli bir motorun performans ve kirletici emisyonları üzerine etkilerini incelemiş ve motor çevrimi üzerindeki değişimleri gözlemlemek için detaylı bir model hazırlamışlardır. Ortaya çıkardıkları bu model sonucunda hidrojen-etil alkol-benzin kullanan motorun tüm performans parametrelerinin geliştirildiğini görmüşler, bunun yanında % 4 hidrojen ve % 30 etil alkol ilavesi sayesinde CO emisyonları % 49, NO_x emisyonları % 39 ve özgül yakıt tüketimi % 49 oranında azaltılırken, termal verim ve motor çıkış gücü % 5 ve % 4 oranında artırılmıştır. Etil alkol oranı % 30'un üzerine çıktığında yakıtın

buharlaşmaması sonucunda anstabil yanma oluştuğundan çıkış gücü ve termal verimde düşüş gözlenmiştir [14].

Dizel motorlarında da hidrojen karışımli çalışmalar yapılmıştır. Gopal ve arkadaşları, 1981 yılında konvansiyonel tek silindirli, dört zamanlı bir dizel motorunu ana yakıtta hidrojen ilavesine uygun hale getirmişlerdir. Çalışmanın ana amacı çeşitli çalışma şartları altında hidrojen ve dizel yakıtının optimum çalışma aralıklarını tespit etmek ve yanma prosesi üzerinde çalışmaktı. Yaptıkları çalışmalar sonucunda hidrojen-dizel ikili yakıtlı motorların oldukça ümit verici olduklarını rapor etmişlerdir. Termal verimin neredeyse tüm çalışma aralıklarında dizel motorundaki ile aynı olduğu fakat hidrojen enjeksiyonu başlatıldığında düşük dizel yakıt oranlarında termal verimde bir düşüş, yüksek dizel yakıt oranlarında ise artış gözlemlemişlerdir. Diğer bir önemli sonuç ise özellikle düşük dizel yakıt akışı esnasında hidrojen ilavesi belirli bir değerin üzerine çıktığında vuruuntu oluşmasıydı. Bundan dolayı ana problemin özellikle stokiyometrik şartlarda vuruuntu olduğu sonucuna varmışlardır [16].

Mathur ve arkadaşları, 1992 yılında, dizel-hidrojen ikili yakıtı konusunda sıkıştırma ateşlemeli motorlar üzerinde çeşitli çalışmalar yapmışlardır. Hidrojenin, toplam yakıt enerjisinin % 38'ini oluşturuncaya kadar dizel yakıtla karıştırılabileceğini, bu durumda sistemin veriminde bir kayıp olmayacağını ve motor çıkış gücünde çok az bir kayıp olduğunu rapor etmişlerdir. Motor vuruuntusunu önlemek amacı ile nitrojen, helyum ve suyu diluent olarak kullanmışlardır. Çok az miktarda su enjekte edildiğinde hidrojen enerji oranı % 66'ya kadar çıkarılmış bunun yanında çıkış gücünde ve termal verimde çok az bir düşüş gözlemlemişlerdir. Ayrıca su enjeksiyonun NO_x duman ve diğer egzoz emisyonlarını azalttığı görülmüştür. Nitrojenin motor performansı açısından en iyi diluent olduğu ve enjeksiyonu sayesinde hidrojen miktarının %48 oranında artırıldığını, termal verimde bir azalma olmadan motor gücünde çok az bir düşme olduğunu görmüşlerdir [17].

Son zamanlarda doğalgaz-hidrojen karışımlarının yanma karakteristiklerini belirlemek için çok miktarda çalışma yapılmıştır. Benzinin yerini alması düşünülen sıkıştırılmış

doğalgaza olan ilgi tekrar arttığı için gelecekte alternatif yakıt olarak bu yakıtların karışımları düşünülmektedir [8].

Raman ve arkadaşları, 1980'lerin sonundan beri Hydrogen Consultant Inc. (HIC)'de metan ile % 0-20 oranlarında hidrojenin karışımı olan "hythane" üzerinde çalışmalar yapmaktadırlar ve bir çok prototip aracın bu yakıt sistemine dönüşümünü gerçekleştirmişlerdir [18]. Florida Solar Energy Center'da araştırmacılar metan-hidrojen karışımları üzerinde çalışmalar yapmışlardır. HY-TEST ismini verdikleri araştırmalarında, % 20-50 oranında hidrojeni metan içerisine karıştırılarak motor yakıtı olarak kullanmışlardır [19].

Das ve arkadaşları, 1996 yılında, optimum motor çalışmasını yakalamak için hidrojen doğalgaz karışım kontrol ve enjeksiyon sistemi geliştirmek üzere çalışmalar yapmışlardır. Hidrojen ve doğalgaz karışımlarının karakteristiklerini inceleyen araştırmacılar, özellikle fakir karışımlarda tam açık kelebek pozisyonunda güç seviyesinin arttığını gözlemlemişlerdir [20].

Liu ve arkadaşları, 1995 yılında, çeşitli oranlarda hidrojen metan karışımlarının vuruntu üzerinde oluşturduğu etkileri incelemek amacı ile detaylı bir model hazırlamışlardır. Bu model ve ikili yakıtla yaptıkları çalışmalar sonucunda, diğer yakıtlardan çok farklı karakteristiklere sahip olan hidrojenin erken tutuşma aktivitesinin düşük olduğu ancak silindir içerisinde hidrojen oranı arttıkça erken tutuşma ihtimalinin arttığını gözlemlemişlerdir. Hidrojen ilavesi ile vuruntulu çalışma alanının diğer gaz yakıtlara göre arttığını, bundan dolayı hidrojenin ikili yakıt sistemlerinde kullanıldığında yüksek vuruntu meydana gelmesi nedeniyle dikkat edilmesi gerektiği sonucuna varmışlardır [21,22].

Tablo 1.1. Çeşitli çalışmalardan alınan hidrojen-benzin ikili yakıt kullanımı genel verim değerleri [25].

| Motor Tipi | Yakıt Deposu | Genel Verim | %H ₂ M=Kütleli, EN=Enerji oranı |
|----------------------------|----------------------------|------------------------|--|
| 6-Silindir MB 280 TE | 284 kg TiVMn Hibrid | + %15 , +%20 | M : %100 Rölanti, %30-60 Kısmi Yük, %0 Tam Yük |
| 4-Silindir Volga TA3-24 | 180 kg LaNi ₅ | + %18 | M: %24 , EN: %48 |
| 4-Silindir Lab. Motoru | GH ₂ (Silindir) | 3000 d/dak'da + %35 | EN: %30-100 (750 g/h H ₂) |
| 4-Silindir Lab. Motoru | GH ₂ (Silindir) | + %10 , + %18 | M: %28 Düşük Yük , %3 Yüksek Yük |

Yukarıda sunulan çalışmalar ışığı altında çalışmamızda; geleceğin yakıtı olarak görülen hidrojenin, hidrojen-benzin ikili yakıtı olarak elektronik kontrollü çok noktadan enjeksiyonlu benzin motorlarında kullanımını sağlayarak, çeşitli çalışma şartlarında optimum karışım oranlarını tespit etmek ve hidrojenin egzoz emisyonlarına etkisini incelemek amaçlanmıştır.

2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR SIRASINDA KULLANILAN MATERYALLER ve YÖNTEMLER

Deneysel çalışmalarda kullanılan materyaller ve yöntemler, alt başlıkları ve ilgili açıklamaları ile birlikte verilmiştir. Açıklamalar sırasında bilinen konulara daha kısa yer verilmiş, tezin konusu ile ilgili materyaller ve yöntemler öneminden dolayı daha geniş açıklanmıştır.

2.1. Deneysel Çalışmalarda Kullanılan Materyaller

2.1.1. Hidrojen

Hidrojen ilk olarak 18. yy'da ayrıntılı olarak incelenmiştir. Periyodik tabloda ilk element olan hidrojen (H) bir proton ve bir elektrona sahiptir. Hidrojen kainattaki en hafif ve en küçük elementtir. Normal sıcaklıklarda renksiz, kokusuz ve zehirsiz olan hidrojen 20 K sıcaklıkta yoğunlaşır, 14 K sıcaklıkta katı faza geçer [23]. Burada hidrojenin motor yakıtı olarak kullanılmasyla ilgili karakteristikleri olan fizikokimyasal özellikleri, üretim ve depolama yöntemleri alt başlıklar halinde verilmiştir. Ayrıca Tablo 2.3'te hidrojen ve benzinin, Tablo 2.4'te hidrojen ve diğer alternatif yakıtların çeşitli fiziksel ve kimyasal özellikleri verilmiştir.

2.1.1.a. Hidrojenin Fizikokimyasal Özellikleri

Tutuşma Sınırları: Bir yakıtın en önemli özelliklerinden biri olan tutuşma sınırları, motor yakıtları için de çok önemlidir ve motorun çalışabileceği yakıt-hava oranı aralığı için bir ölçüdür. Diğer yakıtlarla karşılaştırıldığında hidrojen çok geniş tutuşma sınırlarına sahiptir.

Benzinde yanma olayının gerçekleşmesi için birim hava hacmi başına düşmesi gereken minimum hacimsel yakıt-hava oranı % 1'dir. Bu değer % 1,76'lık stokiyometrik değerden çok düşük değildir. Hidrojen, havada stokiyometrik karışım değerinin % 29,53 olmasına karşın, % 4 olması durumunda bile yanabilir. Bu özelliğinden dolayı hidrojen, motorun çok fakir karışımlarda çalışmasına olanak tanır, böylece yakıt ekonomisi de artar [8].

Hidrojen, konvansiyonel yakıtlarla karıştırıldığında ana yakıtın alt tutuşma sınırını düşürür ve bu sayede daha fakir karışımlarda yanma sağlanır. Ayrıca daha yüksek sıkıştırma oranında çalışmasını sağlaması sayesinde hidrojenle zenginleştirilmiş yakıtlar, konvansiyonel yakıtlarla karşılaştırıldığında daha yüksek termal verim sağlarlar. Aşırı fakir çalışma koşullarında yanma sonu sıcaklığı düştüğü için egzoz emisyonlarındaki nitrojen oksit miktarı da düşer [4].

Tutuşma sınırının alt değeri benzininkinden yüksek olduğundan hidrojen, daha emniyetli bir yakıt gibi görülmektedir, ancak çok geniş tutuşma sınırlarına sahip olması sistemden oluşabilecek herhangi bir sızıntı durumunda, sistemin emniyetli olmayacağını göstermektedir [7].

Minimum Ateşleme Enerjisi: Ateşleme için ihtiyaç duyulan en düşük enerji olan ateşleme enerjisi, bir yakıtın diğer bir önemli özelliğidir. Hidrojenin ateşleme enerjisi, benzininkinden çok düşüktür. Bu sayede ateşleme, konvansiyonel sistemlerle sağlanabilir. Ancak hem bu değer çok düşük olması hem de tutuşma sınırlarının çok geniş olması, silindirlerdeki artık sıcak gazların ve sıcak noktaların ateşleme kaynağı olarak hareket etmesine yol açar ve bu sayede sistem yüzey ateşlemesine uygun hale gelir. Yüzey ateşlemesi, aşırı ısınmış valf, buji veya karbon depozitleri gibi yanma odası duvarındaki sıcak noktalar tarafından yakıt-hava karışımının kontrolsüz ateşlenmesidir ve istenmeyen bir fenomendir. Çünkü erken yanma, geri tutuşma ve yüksek basınç artış oranı gibi istenmeyen yanma olaylarını doğurmaktadır [1,8,24].

Konvansiyonel yakıt-hidrojen karışımı kullanıldığında, hidrojen ana yakıtın ateşleme enerjisini düşürdüğü gibi saf hidrojen kullanıldığında ortaya çıkabilecek bu fenomenlerden uzaklaşmış olur.

Sönme Mesafesi: Yanma odasında alev, silindir duvarına belirli bir mesafe kalınca söner. Bu mesafeye sönme mesafesi denir ve hidrojen için bu değer benzininkinden çok düşüktür. Böylece alev sönmeye önce silindir duvarına çok daha yakınlaşmış olur. Daha küçük sızma mesafesi geri yanma riskini artırır. Çünkü bu özellik sayesinde

hidrojen-hava karışımının alevi hidrokarbon-hava karışımından çok daha kolay bir şekilde kapanmak üzere olan emme valfinden geri doğru sızarak emme portunda istenmeyen yanma olayına neden olabilir [8].

Kendiliğinden Tutuşma Sıcaklığı: yanabilir yakıt-hava karışımın kendi kendine tutuşabileceği minimum sıcaklık olarak tanımlanır. Motorlarda ise buji kıvılcımı dışında harici bir enerji kaynağı ile yakıt-hava karışımının kendi kendine tutuşma sıcaklığı vuruntu olayının meydana gelmesi açısından oldukça önemlidir. Hidrojen için bu değer oldukça yüksektir. Bu faktör motor tarafından kullanılacak olan sıkıştırma oranının tespitinde de en önemli faktörlerden biridir.

$$T_2 = T_1 \cdot (V_2 / V_1)^{k-1} \quad 2.1$$

denkleminde V_1/V_2 sıkıştırma oranını, k özgül ısıların oranını, T_1 ve T_2 sıkıştırma başlangıç ve sonundaki sıcaklıkları göstermektedir. Görüldüğü gibi sıkıştırma oranı, T_2 son sıcaklığı ile sınırlandırılmaktadır. Bu sıcaklık kendiliğinden tutuşma sıcaklığını geçemez, aksi takdirde erken yanma olayının oluşmasına yol açar. Hidrojenin kendiliğinden tutuşma sıcaklığı yüksek olduğundan, sıkıştırma oranı artırılabilir ve bu sayede motorun termal verimi artırılmış olur. Diğer taraftan bu özellik nedeniyle hidrojenin dizel motorlarında kullanımı zorlaşır [8].

Hidrojenin kendiliğinden tutuşma sıcaklığının yüksek olması vuruntu direncini artırdığı gibi oluşabilecek bir yakıt kaçağının motorun sıcak parçaları ile teması durumunda tutuşma riskini de azaltır [4].

Alev Hızı: Hidrojenin alev hızı Tablo 2.3'te görüldüğü gibi benzininkinden çok daha yüksektir. Bu özellik, yanmanın sabit hacimde gerçekleşmesine katkıda bulunur ve böylece termodinamik ideal otto çevrimine yaklaşılmış olur [4-24].

Hidrojen-hava karışımının alev hızı 265-325 m/s civarındadır ve karışımın sıcaklığı arttıkça ve zengin karışıma yaklaşıldıkça alev hızı artmaktadır [23-24].

Difüzite: Hidrojenin difüzitesi (havada yayılma hızı) benzininkinden çok daha yüksektir. Bu özellik sayesinde yakıt ve havanın çok daha üniform karışım oluşturması ve sistemde oluşabilecek bir sızıntı durumunda hidrojenin çok hızlı bir şekilde dağılması gibi iki önemli avantaj sağlamaktadır [8-23].

Yoğunluk: Hidrojen çok düşük yoğunluğa sahiptir. Bu durum; araca yeteri kadar hidrojen depolayabilmek için çok büyük hacme ihtiyaç duyulması ve hidrojen-hava karışımının enerji yoğunluğunun, bu sayede motor çıkış gücünün düşük olması gibi iki önemli dezavantaj ortaya çıkarmaktadır [8].

2.1.1.b. Üretim Yöntemleri

Yeryüzünde elemensel hidrojen serbest halde çok az miktarda bulunur [23]. Bundan dolayı hidrojen zengin bileşiklerden üretmek, hidrojen ihtiyacını karşılamanın tek yoludur. Hidrojen, hem çok değişik metotlarla hem de çok farklı materyallerden üretilmektedir [8]. Hidrojen en yoğun olarak su, kömür, petrol ve doğalgazda bulunur [25].

Günümüzde kullanılan hidrojen üretim teknikleri şu şekilde sıralanabilir:

- Fosil yakıtlardan üretim yöntemi,
- Suyun elektrolizi yöntemi,
- Suyun termokimyasal olarak ayrıştırılması yöntemi,
- Fotokimyasal yöntem ve
- Biyokütlelerden üretim yöntemi.

Ayrıca geleceğin yakıtı olarak düşünülen hidrojenin özellikle araçlarda kullanımının hayata geçirilmesinde karşılaşılan depolama ve dağıtma problemlerinin önüne geçebilmek için, araç üzerinde hidrojen üretim yöntemleri konusunda çalışmalar sürdürülmektedir. Hidrojen araç üzerinde plasmatron, parçalama (cracking), egzoz gazı reformasyonu, termokimyasal ve rejeneratif frenleme yöntemleri ile üretilir [26].

Fosil yakıtlardan ve biyokütlelerden hidrojen üretimi için hidrokarbonlar, reformasyon, parçalama, oksidasyon ve gazlaştırma işlemlerine tabi tutulurlar [25]. Günümüzde hidrojen üretiminde kullanılan en etkin ve yaygın metot fosil yakıtların buhar reformasyonu olarak adlandırılan hidrokarbon ve buharın hidrojene ve karbonoksitlere dönüştürüldüğü metottur. Ancak fosil yakıtlardan hidrojen üretimi temiz ve yenilenebilir bir yöntem değildir.

Ticari kullanımı 1870' lere dayanan elektroliz teknolojisiyle, hidrojen üretimi, saf su ve elektrik enerjisi ile yapılmaktadır. Fosil yakıtlardan hidrojen üretimi de pahalı olmasına rağmen bu yolla üretim sonucunda maliyet üç-beş kat daha fazladır. Suyun elektrolizine alternatif bir teknik olan termokimyasal su ayrıştırması yönteminde suyun bileşenlerine ayrıştırılması için yalnızca ısı kullanılır. Böylece elektroliz için gerekli elektrik enerjisi kullanılmayarak yüksek işletim maliyetinin önüne geçilmiş olur [8].

Fotovoltaik donanımlar ve biyolojik organizmalar güneş enerjisini toplamak amacı ile günümüze kadar araştırılabilen sistemlerdir. Güneş enerjisi absorbe edilerek elde edilen ısı vasıtasıyla su, hidrojen ve oksijen atomlarına parçalanabilir. Fotovoltaik hidrojen, yenilenebilir yakıt ve elektrik kaynağıdır. Finlandiya, Almanya, İtalya, Japonya, Suudi Arabistan, İsviçre, A.B.D. gibi çeşitli ülkelerde bu tür üretim tesisleri kullanılmaktadır[27].

Güneş-hidrojen enerji sistemlerinde güneş enerjisi doğrudan veya dolaylı olarak kullanılıp, çeşitli yöntemlerle hidrojen üretilebilir. Üretimden sonra hidrojen boru hatları veya tankerler ile elektrik üretiminde kullanılacağı yere veya ısıtma ve taşıma için doğrudan yakıt olarak kullanılacağı yere taşınabilir. Güneş enerjisi ile hidrojen üretimi sayesinde kirlilik, asit yağmurları ve greenhouse etkisi gibi çevresel problemlerin ortadan kaldırılacağı düşünülmektedir [28].

Araç üzerinde hidrokarbon yakıttan hidrojen zenginleştirilmiş gaz (hidrojen ve karbonmonoksit) üretimi ile de hem hidrojenin depolanması ile oluşan hacim ve ağırlık kayıpları hem de ortaya çıkarılan kirlilik azaltılmış olmaktadır [29].

Tablo 2.1. 2000 yılında 300 mil (483 km) mesafe için içten yanmalı motorlu araçlar için yakıt maliyetleri [30]

| Yakıt | Maliyet (1996 \$/km) | | Ortalama maliyet 1996 (\$/km) |
|--------------------------|----------------------|--------|----------------------------------|
| | Düşük | Yüksek | |
| Rüzgar-H ₂ | 0,0792 | 0,1195 | 0,0993 |
| PV-H ₂ | 0,0891 | 0,1654 | 0,1273 |
| Su-H ₂ | 0,0431 | 0,0813 | 0,0622 |
| Biyokütle-H ₂ | 0,0354 | 0,0509 | 0,0431 |
| Doğalgaz-H ₂ | 0,0304 | 0,0530 | 0,0417 |
| Etanol-H ₂ | 0,0391 | 0,0539 | 0,0465 |
| Metanol-H ₂ | 0,0260 | 0,0318 | 0,0289 |
| CNG-H ₂ | 0,0165 | - | 0,0165 |
| LPG-H ₂ | 0,0215 | 0,0234 | 0,0224 |
| Benzin | 0,0301 | - | 0,0301 |

2.1.1.c. Depolama Yöntemleri

Hidrojen araçlarının gelişmesinde en büyük engel, araç üzerinde yeteri kadar hidrojen depolanamaması gerçeği olarak görülmektedir [31]. Hidrojen araç üzerinde belirli metallerle bağ yaptırılarak, krojenik (soğuk) depolarda sıvı olarak veya yüksek basınçlı kaplarda sıkıştırılmış gaz olarak depolanabilir. Cam mikroküreler, soğuk absorbentler ve sıvı hidridler literatürde yer almasına rağmen sıvı hidridler dışında kalan yöntemlerde çok fazla gelişme kaydedilememiştir [25].

Metal Hidridler: Hidrojenin; demir, magnezyum, nikel, manganez ve titanyum gibi belirli metallerle bağ yaptırılarak depolanması ve daha sonra ısıtılarak geri alınması yöntemidir. Düşük maliyet, düşük geri alışı sıcaklığı, yüksek absorpsiyon hızı, gazdaki impuritelere tarafından kirlenme ihtimalinin düşüklüğü ve düşük hacimsel genişleme gibi özellikler hidrid sistemlerinin genel karakteristikleridir [25]. Hidrid depolama sistemlerinde karşılaşılan en ciddi sorun düşük enerji-kütle yoğunluğuna sahip olmaları ve bu yüzden depoların çok ağır olmalarıdır. Hidrid ve soğutma sistemini içeren hidrid

soğutma sisteminin ağırlığı 120-485 kg olmasına rağmen bunun sadece % 0,5-2'si arasında hidrojen içerirler[8].

Sıvı Hidrojen: Hidrojen yaklaşık 20 K sıcaklık ve 2 bar (200 kPa) basınç altında sıvılaşır. Sıvı hidrojen (LH₂) sistemlerinin en önemli avantajı, hidrid sistemlerine göre çok daha hafif ve sağlam olmalarıdır [25]. Ağırlık ve enerji yoğunluğu açısından sıvı hidrojen tankları taşıma alanında en uygun olmalarına rağmen, uygulamada çeşitli problemler söz konusudur [32]. İçten yanmalı motorlarda kullanımında ortaya çıkan çeşitli problemlerin yanında sıvı hidrojen depolama sistemlerinde günde % 2 oranında buharlaşma kaybı söz konusudur [33].

Sıkıştırılmış Gaz: Hidrojenin depolanmasında kullanılan en basit ve cazip yöntemdir. Hidrojen 200 bar basınçta, çevre sıcaklığında silindirler içerisinde depolanabilir ancak bu yöntemin en önemli dezavantajı düşük enerji yoğunluğudur [33]. 200 bar basınç 298 K sıcaklıkta 5.7 kg ağırlığındaki sıkıştırılmış gaz hidrojenin sürüş aralığı 420 km'dir ancak bu miktarda hidrojenin depolanabilmesi için 397 lt kadar yüksek hacme ihtiyaç duyulmaktadır [25].

2.1.2. Benzin

Benzin, günümüzde buji ateşlemeli motorlarda kullanılan yakıttır. Karbon atomu sayısı 4 ile 10 arasında değişen sıvı HC bileşenlerinden ibaret bir karışımdır. Ham petrolün bileşimine ve rafineride uygulanan metoda bağlı olarak çok değişik kimyasal yapılarda olabilir. Az miktarda hafif ve ağır HC'lar, çok az miktarda ham petrolden gelen kükürt ve azot gibi istenmeyen elementler ve bazı özelliklerini iyileştirmek için eser miktarda ilave edilen katkı maddeleri benzinin içinde bulunan bileşenlerdir. Benzinde aranan performans özellikleri;

- Vuruntu mukavemeti,
- Uygun buharlaşma,
- Zamk ve vernik oluşturmamak,
- Yakıt ve yanma ürünlerinin korozif olmaması,

- Düşük alevlenme tehlikesi ve
- Ucuz elde edilmesidir [38].

Tablo 2.2’de, deneylerde kullanılan kurşunsuz benzinin, Türkiye Petrol Ürünleri A. Ş. Product Specifications kataloğundan alınan genel özellikleri verilmiştir.

Tablo 2.2. Deneylerde kullanılan benzinin özellikleri

| | |
|----------------------------------|----------------|
| Görünüm | Açık ve parlak |
| Yoğunluk (15 °C’de, kg/l) | 0,725-0,78 |
| Korozyon, bakır şerit (50 °C’de) | No.1 |
| Kalıntı (% Hacim) | 2 |
| Doktor testi | Negatif |
| Sakızlaşma, var olan (mg/100 ml) | 5 |
| Oksitlenme dayanımı, (dakika) | 360 |
| Oktan sayısı, RON | 95 |
| Oktan sayısı, MON | 85 |
| Kurşun tetra etil (gPb/l) | 0,013 |
| Kükürt (% ağırlık) | 0,05 |
| Reid buhar basıncı (kPa) | 35-70 |

Tablo 2.3. Hidrojen ve benzinin çeşitli fizikokimyasal özellikleri [4,7,23]

| Özellik | Hidrojen | Benzin |
|---|---------------------------|-----------|
| Molekül Ağırlığı | 2,016 | 107,0 |
| Yoğunluk (20 °C, 760 mm-Hg), g cm ⁻³ | 83,764 x 10 ⁻⁶ | 0,70-0,75 |
| Sıvı Yoğunluk, g cm ⁻³ | 0,708 | 0,70-0,75 |
| Tutuşma Sınırları (Havada), % Hacim | 4-75 | 1,0-7,6 |
| Stokiyometrik Karışım, % Hacim | 29,63 | 1,76 |
| Hava-Yakıt Oranı Çalışma Aralığı | | |
| Birim Ağırlık Başına | 364,8-4,8 | 25-4,3 |
| Birim Hacim Başına | 24-0,3 | 100-16,7 |
| Teorik Hava-Yakıt Oranı | | |
| Birim Ağırlık Başına | 34,3 | 15,1 |
| Birim Hacim Başına | 2,38 | 59,5 |
| Minimum Ateşleme Enerjisi (Havada), MJ | 0,02 | 0,24 |
| Sönme Mesafesi, mm | 0,6 | 2,84 |
| Kendiliğinden Ateşleme Sıcaklığı, K | 858 | 501-744 |
| Yanma Hızı (Havada, NŞA), cm sn ⁻¹ | 265 | 325 |
| Alev Sıcaklığı (Havada), K | 2318 | 2470 |
| Alev Tarafından Yayılan Isıl Enerji Yüzdesi | 17-25 | 30-43 |
| Yükselme Hızı (Havada, NŞA), m sn ⁻¹ | 1,2-9 | Yükselmez |
| Detonasyon Hızı (Havada, NŞA), km sn ⁻¹ | 1,48-2,15 | 1,4-1,7 |
| Dinamik Viskozite, g cm ⁻¹ sn ⁻¹ | 0,0000875 | 0,002 |
| Alt Isıl Değer, MJ kg ⁻¹ | 120.000 | 44.000 |
| Net Enerji Yoğunluğu (15 °C, 101,3 kPa), MJ m ⁻³ | 202 | 10,3 |
| Özgül Isı (c _p , NŞA), kJ g ⁻¹ K ⁻¹ | 14,89 | 1,62 |
| Özgül Isı Oranı (v, NŞA, gaz) | 1,383 | 1,05 |
| Gaz Sabiti (R), cm ³ atm ⁻¹ g ⁻¹ K ⁻¹ | 40,7030 | 0,77 |
| Özgül Isıl Absorbsiyon, J g ⁻¹ K ⁻¹ | 14,89 | 2,20 |

Tablo 2.4. Çeşitli yakıtların fiziksel ve kimyasal özellikleri [9,24,25]

| Özellik | Hidrojen | Metan | Metanol | Etanol | Benzin |
|---------------------------------------|-------------------------|---------------------|--------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| Kimyasal Denklem | H ₂ | CH ₄ | CH ₃ OH | C ₂ H ₅ OH | C ₈ H ₁₈ * |
| C/H Oranı | 0 | 0,25 | 0,25 | 0,333 | 0,556 |
| Molekül Ağırlığı | 2,016 | 16,04 | 32,04 | 46,07 | 91,4 |
| Özgül Ağırlık, g cm ⁻³ | | | | | |
| Sıvı | 0,708 | 0,424 | 0,79 | 0,79 | 0,70-0,75 |
| Gaz | 83,764x10 ⁻⁶ | 78x10 ⁻⁵ | | | |
| Tutuşma Sınırları | | | | | |
| % Hacim | 4,1-74 | 5-15,4 | 6-37 | 3,5-19 | 1,3-7,6 |
| λ | 0,15-4,35 | 0,59-2,0 | 0,24-2,22 | 0,29-1,92 | 0,26-1,67 |
| Stokiyometrik Karışım İçin | | | | | |
| Hava-Yakıt Oranı (Kütlesel) | 34,32 | 17,2 | 6,44 | 8,96 | 14,7 |
| Hava-Yakıt Oranı (Hacimsel) | 2,38 | 9,53 | 7,14 | 14,3 | 45,79 |
| (kJ Lt ⁻¹) | 3,20 | 3,4 | 3,53 | 3,61 | 3,78 |
| mol ürün/ mol reaktantlar | 0,85 | 1,00 | 1,06 | 1,06 | 1,04 |
| Kendikendine Tutuşma Sck., K | 847-864 | 905 | 743 | 665 | 530 |
| Laminar Alev Hızı, m sn ⁻¹ | 2,91 | 0,37 | 0,52 | | 0,37 |
| Adyabatik Alev Sıcaklığı, K | 2383 | 2227 | 2151 | 2197 | 2266* |
| Buharlaşma Isısı, MJ kg ⁻¹ | 0,447 | 0,509 | 1,102 | 0,856 | 0,272 |
| Kaynama Noktası, K | 20,65 | 111,7 | 338,1 | 351,7 | 305-478* |
| Donma Noktası, K | 14 | | 175,4 | 155,9 | 217 |
| Isıl Değer | | | | | |
| MJ kg ⁻¹ | 119,93 | (alt) 50,8 | 20,1 | 26,9 | 43,4 |
| | | 141,86 (üst) | | | |
| Mj m ⁻³ | 8,41 | 20,8 | 15,9 | 21,3 | 31,8 |
| Oktan Sayısı | | | | | |
| ROS | 130 | 130 | 110 | 106 | 91-100 |
| MOS | | 105 | 87 | 89 | 82-94 |

2.1.3. Motor

Test standı üzerine yerleştirilen motorun teknik özellikleri Tablo 2.5’de verilmiştir.

Tablo 2.5. Deneylerde kullanılan motorun teknik özellikleri [34]

| Motor Tipi | Ford MVH418, 4-Stroklı, Su Soğutmalı, Enjeksiyonlu ve Buji Ateşlemeli |
|----------------------------------|---|
| Silindir Tipi-Sayısı | Sıra Tipi-4 |
| Subap mekanizması tipi-sayısı | DOHC-16 |
| Ateşleme Sırası | 1-3-4-2 |
| Strok | 88 mm |
| Çap | 80.66 mm |
| Maksimum ortalama efektif Basınç | 10.7 Bar |
| Toplam Silindir Hacmi | 1796 cm ³ |
| Krank Çapı | 44 mm |
| Biyel Uzunluğu | 132 mm |
| Sıkıştırma Oranı | 10 : 1 |
| Yükseklik | 673 mm |
| Uzunluk | 628 mm |
| Genişlik | 559 mm |
| Maksimum Güç | 5500 d/dak’da 75 kW |
| Maksimum Moment | 4000 d/dak’ da 157 Nm |
| Rölanti Hızı | 900 ± 50 dev/dak |
| Yakıt Enjeksiyon Sistemi | Elektromekanik yakıt enjektörlü elektronik kontrollü yakıt enjeksiyonu |
| Yakıt Pompasının Kapasitesi | 65 lt/h (minimum) |
| Yakıt | Kurşunsuz benzin |

2.2. Deney Düzeneği ve Kullanılan Ölçü Aletleri

Deneylemiz hidroluk fren (dinamometre) tezgahına yerleştirilen Ford MVH-418 tipi, 4-strokluk, su soğutmalu, yakıt enjeksiyonlu, benzinli motor kullanılmıştır. Kullanılan motorun teknik özellikleri Tablo 2.5’de verilmiştir. Deney düzeneği genel görünümü ve ilgili ekipmanları Şekil 2.1’de verilmiştir.

Tüketilen yakıt miktarı ölçümü için operatör tarafından belirtilen sürede tüketilen yakıt miktarını veya yine operatör tarafından belirtilen miktarda yakıtın tükenme süresini bildiren gravimetrik yakıt miktarı ölçüm cihazı kullanılmıştır.

Motor tarafından tüketilen hava miktarını ölçmek amacıyla hava tankı ve TESTO 400 cihazı kullanılmıştır. Hava hızı ölçüm probu sıcak tel esasına göre çalışmakta 0–20 m/sn aralığında ölçüm yapmaktadır.

Egzoz emisyon değerlerini gözlemek ve motorun çalışması hakkında fikir yürütmek amacı ile egzoz emisyon cihazı kullanılmıştır. Bu cihaz CO, CO₂ ve O₂’nin yüzde değerlerini; HC’un ise ppm (milyonda partikül) değerini vermektedir.

Hidrojen gaz debisinin ölçümü için Cole-Parmer üretimi topaçlı debi ölçer kullanılmıştır.

Motorun basınç-hacim değişiminin ve ateşleme zamanının gözlenmesi için çeşitli transdüzörler ile birlikte indikatör cihazı sisteme adapte edilmiştir.

Motor bloğu soğutma suyu ve egzoz gaz kalorimetresi soğutma suyu ve hidroluk fren için 25 ton kapasiteli su tankı yerleştirilmiştir. Soğutma suyu debisi ölçümünde orifis-manometre düzeneği kullanılmıştır.

2.2.1. Güç Ölçüm Ünitesi (Hidrolik Fren)

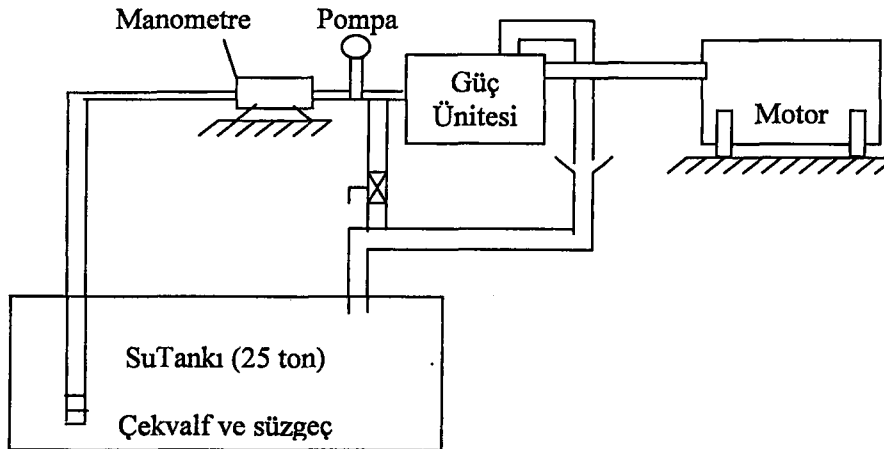
Motor deneylerinde üretilen gücü yutan ve yüklemeyi sağlayan iki tür yükleme elemanı kullanılır.

- 1- Jeneratör ile yükleme (Elektrik dinamometresi)
- 2- Su freni ile yükleme (Hidrolik fren-Bremse tezgahı)

Çalışmalarımızda su freni ile yükleme ünitesi kullanılmıştır. Su freni motor deneylerinde yükleme ve moment ölçümü için uygulanan en yaygın yöntemlerden biridir. Hidrolik frende sıvı olarak su kullanılmaktadır.

Su freni düzenekleri motor yüküne bağlı olarak çeşitli tiplerde yapılmakla beraber çalışma ilkeleri esasta aynıdır. Su freni motor miline bağlı olarak dönen özel kanatlı bir rotor ve rotoru çevreleyen yataklar üzerine oturtulan bir statordan oluşur. Statora ayrıca moment ölçme sistemi ilave edilir [35].

Deneylerde kullanılan güç ünitesi SAS-Froude firması yapımı hidrolik fren sistemidir. Sabit gövde üzerinde hidrolik fren sistemi yer almakta ve karşısında motor bağlama ayakları bulunmaktadır (Şekil 2.2.). Ayaklar üzerine oturtulan motor bir shaft aracılığı ile fren sistemi ile irtibatlandırılmaktadır. Güç ünitesinden moment değeri yükleme hücresi (Load-cell) ile ölçülmektedir. Döndürme momentinin etkisi ile yük hücresinde meydana gelen direnç farkı kumanda panosundan moment olarak okunmaktadır [36].



Şekil 2.2. Güç ünitesi ve motor soğutma suyu şebeke bağlantısı

Kontrol panosu üzerinde bulunan göstergelerden; moment, devir sayısı, motor yağ basıncı, emme manifoldu basıncı ile on farklı noktadan alınan sıcaklık değerleri okunabilmektedir. Pano üzerinde okunan değerlerin hassasiyeti $\pm\% 1$ 'dir. Ayrıca kontrol panosunda soğutma suyu debisi ölçümünde kullanılan manometre, yakıt debisi ölçümünde kullanılan manometre, kontak düzeneği ve gaz pedalı bulunmaktadır .

2.2.2. Yakıt Tüketimi Ölçüm Düzeneği

Motor deneylerinde, motor çalışma şartlarına bağlı olarak tüketilen yakıt miktarının bilinmesi esastır. Bu amaçla deney düzeneğine G. Cussons Ltd. üretimi yakıt tüketimi ölçüm düzeneği dahil edilmiştir. Cihazın bağlantı şeması ve genel prensibi Şekil 2.3'de verilmiştir. Söz konusu cihaz; ölçüm ünitesi, ağırlık kontrol ünitesi ve kontrol ve gösterge ünitesi olmak üzere üç ana bölümden oluşmaktadır [37].

2.2.2.a. Ölçüm Ünitesi

Alt ve üst bölüm olmak üzere iki bölümden oluşur. Alt bölümde seviye sensörü, alüminyum yakıt kabı ve hassas yükleme hücresi (Load cell) bulunur. Yakıtın depodan geliş borusu, yakıt besleme borusu ve yakıt geri dönüş borusu bu kap içerisinde. Yakıt pompası yakıtı bu kaptan çeker ve böylece yakıtın depodan alınması sağlanır. Kabın altında bulunan yükleme hücresinden alınan sinyaller mikro işlemci vasıtası ile kontrol ve gösterge ünitesine aktarılır. Ünitenin üst bölümünde ise ihtiyaç duyulduğunda yakıtın kaba alınmasını sağlayan elektromanyetik valf bulunmaktadır .

2.2.2.b. Ağırlık Kontrol Ünitesi

Bu bölüm, patlayıcı olabilen yakıt buharını yükleme hücresi ve seviye sensörü bağlantılarından uzak tutmak için ölçüm ünitesinin dışında tutulmuştur. Ünitenin üzerinde bulunan göstergeler sistemin açık olup olmadığını, ölçüm ünitesinde bulunan elektromanyetik valfin durumunu ve aşırı dolma durumlarını göstermektedir.

2.2.3. Hava Tüketimi Ölçüm Cihazı

Hava debisi, motorun performansı ve emisyon karakteristiklerinin belirlenmesinde en önemli parametrelerden birisidir. Hava yakıt oranı, hava fazlalık katsayısı ve hacimsel verim (volumetrik verim) gibi yanma olaylarının detayları, emisyon özellikleri ve müsaade edilebilir çalışma sınırları hakkında yeterli bilgi elde edebilmek için tüketilen hava miktarının mutlaka bilinmesi gerekir [38].

Ancak motor tarafından emilen hava miktarının önemli bazı güçlüklerle karşılaşılmaktadır. Bunlardan en önemlisi pistonların ileri-geri öteleme hareketleri ve her silindirin iki periyot arasında belirli bir süre emiş yapması dolayısıyla emme kanalındaki hava akımının darbeli oluşu ve bu durumun akımın kararlılığını bozarak ölçmeleri zorlaştırması ve hatalı ölçmelere neden olmasıdır. Ölçülen hava miktarındaki hatalar, motorla ölçme yapılan yer arasındaki akış dirençlerine, darbelerin şiddet ve frekanslarına, akışkanın viskozite ve yoğunluğuna bağlıdır. Hatayı en aza indirmek için ölçme yapılan yerde kararlı bir akışı sağlamak ana zorunluluktur. Bunun için ise genellikle kullanılan yol ölçme noktası ile motor arasında damper görevi yapan bir hava deposu kullanmaktır [39]. Deneyde kullanılacak hava tankı kapasitesinin motor strok hacminin 50 katından daha az olmaması istenir [38] (Şekil 2.1).

Deney düzeneğinde hava hızı ölçümü için Testo firması üretimi olan TESTO-400 cihazı kullanılmıştır. Ölçüm için kullanılan prop kızgın tel (Hot-wire) prensibine göre çalışmaktadır. Bu metotta debi, üzerinden belirli bir elektrik akımı geçirilen telin ısınması ve bu ısınan tel, debisi ölçülecek akışkanın içerisine daldırılarak soğuması dolayısı ile elektrik akımının, gerilimin ve akım şiddetinin düşmesinden faydalanarak ölçülmektedir [39].

Cihazın ölçüm probu, -20 - +70 °C sıcaklıkta ve 0 - 20 m/sn aralığında hava hızı ölçümü yapmaktadır. 0 – 2 m/sn arasında 0.03 m/sn; 2 – 20 m/sn arasında ise 0,2 m/sn hassasiyete sahiptir [40].

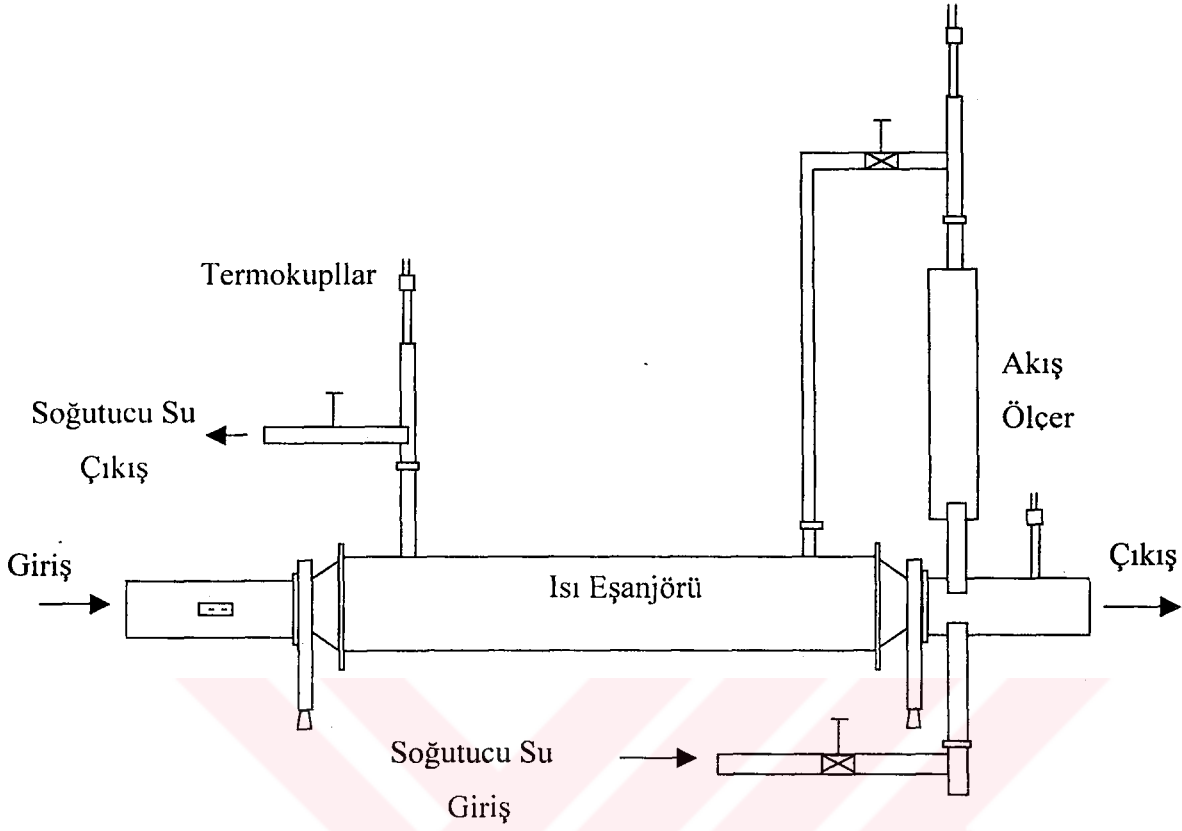
2.2.4. Egzoz Emisyon Cihazı

Silindir içerisinde meydana gelen yanma için değerlendirme kriteri egzoz gazlarını muhteviyatının bilinmesi ile olur. Bu amaçla deneylerde egzoz emisyon cihazı kullanılır. Sistemimizde VLT marka 3040 model egzoz emisyon cihazı kullanılmıştır. Hacimsel olarak ölçüm yapan cihazın emisyon ölçüm aralıkları ve hassasiyet değerleri aşağıdaki gibidir [41].

| <u>Emisyon</u> | <u>Ölçüm Aralığı</u> | <u>Hassasiyet</u> |
|-----------------|----------------------|-------------------|
| CO | % 0 – 10 Hacimsel | % 0.01 |
| HC | 0 – 2.000/10.000 ppm | 1 |
| CO ₂ | % 0 – 20 Hacimsel | % 0,01 |
| O ₂ | % 0 – 21 Hacimsel | % 0,01 |
| Lamda | 0,5 – 3,5 | % 0.001 |

2.2.5. Egzoz Gaz Kalorimetresi

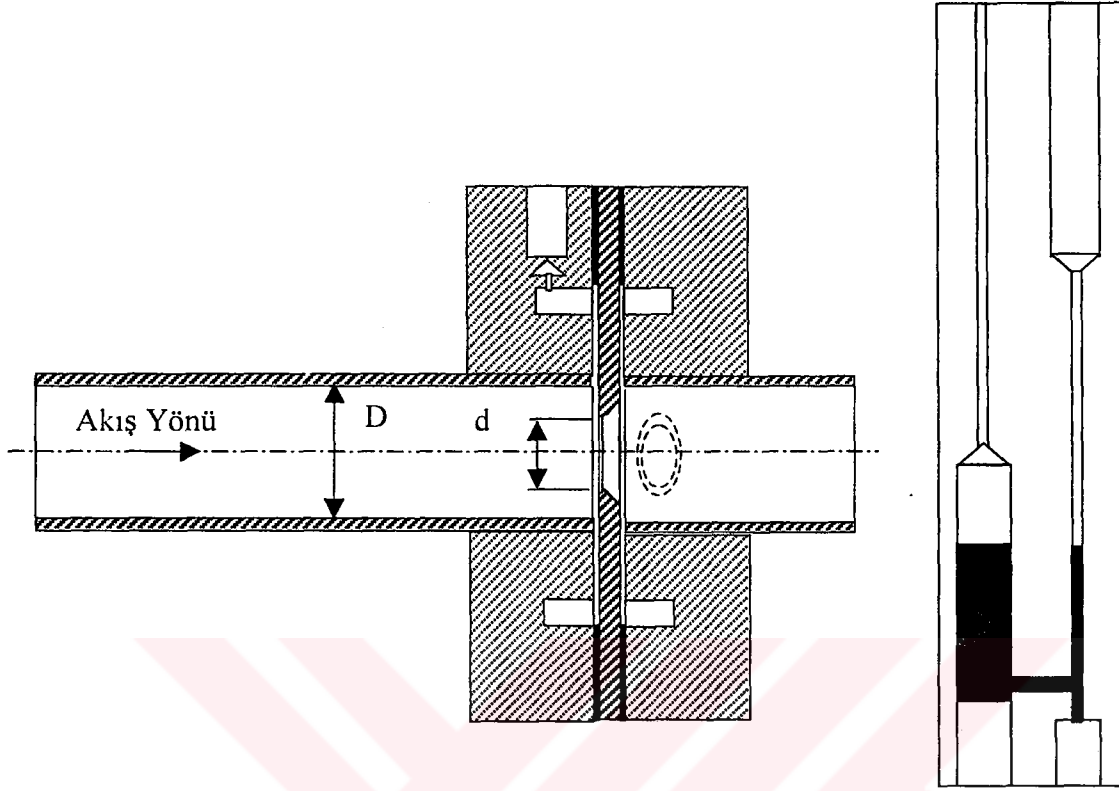
Egzoz gazlarının terkihi yanmaya bağlı olarak değişir. Buna bağlı olarak egzoz gazlarının sabit basınçta özgül ısı değerlerinin tespit edilmesi gerekir. Egzoz borusu üzerine yerleştirilen bir eşanjör sistemi bilinmeyen değerlerin bilinen değerler cinsinden tanımlanmasını sağlar. Deneylerde G. Cussons Ltd. yapımı, R-8262 egzoz gaz kalorimetresi kullanılmıştır. Sıcak egzoz gazları ile harcanan enerjinin belirlenmesi için kullanılan kalorimetredeki eşanjör zıt yönlü akışlıdır. Kullanılan soğutucu su akış ölçeri 120 – 1200 lt/ h kapasiteye sahiptir. Sıcaklık ölçümleri için K tipi termokupllar kullanılmıştır [42].



Şekil 2.4. Egzoz gaz kalorimetresi şematik resmi

2.2.6. Soğutucu Akışkan Akış Ölçeri

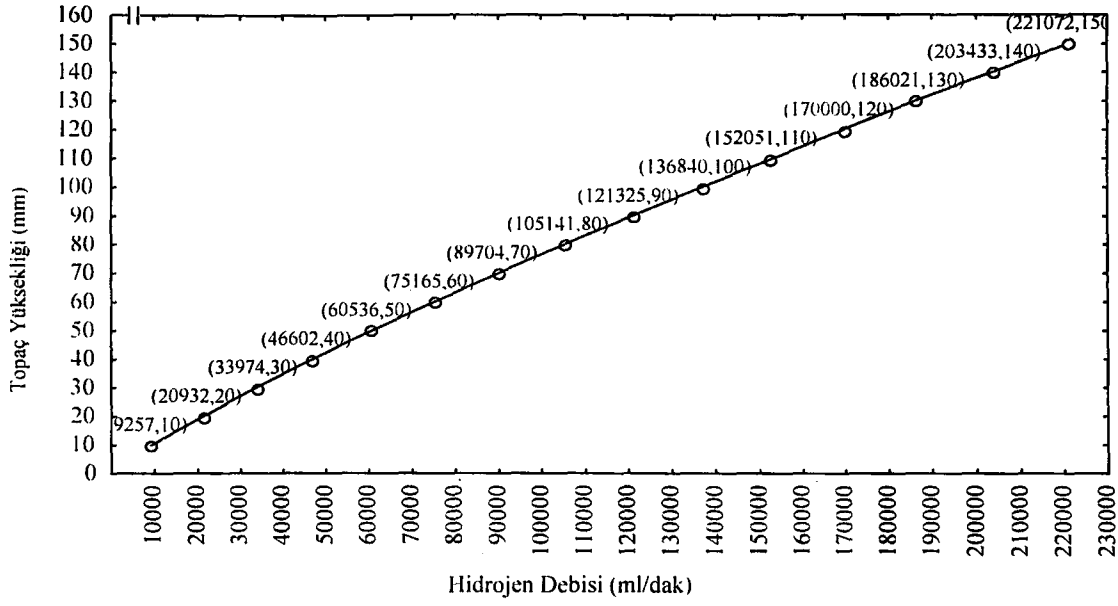
Motor soğutucu akışkan debisi ölçümü için orifis – cıvalı manometre düzeneği kullanılmıştır. Kullanılan akışkan su – antifiriz karışımıdır. Şekil 2.5'te şematik resmi verilen orifiste $d = 30 \text{ mm}$ ve $D = 39.6 \text{ mm}$ 'dir [43].



Şekil 2.5. Orifis Plakası-Manometre düzeneği şematik resmi

2.2.7. Hidrojen Akış Ölçeri

Cole-Parmer firması yapımı topaçlı tip akış ölçer kullanılmıştır. 9.257 – 221.072 ml/dak ölçüm aralığına sahiptir. $-26 - +65$ °C sıcaklık aralığında ölçüm yapan cihazın hassasiyeti tüm sıcaklıklarda \pm % 2 ve maksimum çalışma basıncı 100 psi'dir [44]. Akış ölçerin topaç yüksekliğine bağlı olarak geçen akışkan miktarı Şekil 2.6'da verilmiştir.



Şekil 2.6. Hidrojen akış ölçeri topaç yüksekliği, debi grafiği.

2.3. Deneysel Verilerin Değerlendirilmesinde Kullanılan Bağlıntılar

Benzin ve benzin-hidrojen karışımı yakıtlarla yapılan deneylerden ölçülen değerlerden yararlanarak motor karakteristik eğrilerinin çıkartılması, enerji dağılımlarının belirlenmesi ve her iki durumun karşılaştırılması için yapılan tanımlar ve kullanılan bağıntılar ilgili başlıklarla verilmiştir [1,38]

2.3.1. Efektif Güç, P_e (kW)

Bir motorun iş yapabilme kapasitesi motor milinden alınan moment değeri ile ölçülür. Ölçülen bu moment değerinden faydalanarak efektif güç, aşağıdaki formül yardımı ile hesaplanır.

$$P_e = \frac{2\pi.Md.n}{60.1000}$$

2.2

Düzenlemeler yapıldığında 2.2 bağıntısı,

$$P_e = \frac{Md.n}{9549.3} \quad 2.3$$

olarak elde edilir. Burada;

Md : Moment (Nm),


n : Motor devri (d/dak).

2.3.2. Ortalama Efektif Basınç, P_{me} (MPa)

Motor performansının değerlendirilmesinde işin, bir çevrim boyunca taranan hacme bölünmesiyle faydalı bir parametre elde edilir ki buna da ortalama efektif basınç adı verilir. Bu parametre, motorun gerçek çevrimdekine eşdeğer bir P_e gücünü verebilmesi için bir çevrim boyunca pistona uygulanması gereken sabit basınç olarak tarif edilir.

$$\text{Çevrim başına düşen iş} = \frac{P_e \cdot n_R}{n} \quad 2.4$$

Burada,

n_R : Bir güç stroğu için gerekli krank dönme sayısıdır (dört zamanlı motorlar için 2; iki zamanlı motorlar için 1'dir) 

Bu durumda

$$P_{me} = \frac{60 \cdot P_e \cdot n_R}{V_H \cdot n} \quad 2.5$$

V_H ; Motorun toplam strok hacmidir. Kullanılan motorun silindir çapı 80,6 mm ve stroğu 88 mm olduğundan toplam strok hacmi 1796 cm³ 'tür. Bu değerlerden gidilerek hesaplamalar için genelleştirilmiş olan aşağıdaki bağıntı elde edilir.

$$P_{me} = 66,815 \frac{P_e}{n} \quad 2.6$$

Burada,

n : Devir sayısı, (d/dak)

P_e : Efektif Güç, (kW)

2.3.3. Saatlik Yakıt Tüketimi, B (kg Y/ h)

Birim saniyede tüketilen yakıt miktarları ve yoğunlukları bilindiğine göre benzin ve hidrojen için saatlik yakıt tüketim miktarları aşağıdaki bağıntı ile bulunabilir,

$$B_y = m_y \cdot \rho_y \cdot 10^{-3} \cdot 3600 \quad 2.7$$

Benzin-hidrojen karışımı ile yapılan çalışmalarda saatlik yakıt tüketim miktarı,

$$B_k = (m_g + m_h) \cdot \rho_k \cdot 10^{-3} \cdot 3600 \quad 2.8$$

Kullanılan benzinin yoğunluğu $0,770 \text{ g/cm}^3$ hidrojenin yoğunluğu $83,764 \cdot 10^{-6} \text{ g/cm}^3$ olarak alınırsa karışımın yoğunluğu:

$$\rho_k = \frac{m_g \cdot \rho_g + m_h \cdot \rho_h}{m_g + m_h} \quad 2.9$$

bağıntısı ile hesaplanabilir.

2.3.4. Özgül Yakıt Tüketimi, b_c (g/kWh)

Birin güç başına tüketilen yakıt miktarı olarak tanımlanır. İş üretecek olan motorun yakıtı ne kadar etkin biçimde kullandığını gösterir. Saatlik yakıt tüketiminden hareketle özgül yakıt tüketimi,

$$b_c = B/P_c \quad 2.10$$

bağıntısı ile bulunur.

2.3.5. Efektif Verim, η_c

Yakıtın kimyasal enerjisi yanma sonucunda ısıya ve daha sonra mekanik enerjiye dönüşür ve motor milinden iş elde edilir. Ancak kayıplar sebebiyle elde edilen iş yakıtın kimyasal enerjisinden daha düşük değerdedir. Motor milinden alınan işin yakıt ile verilen toplam enerjiye oranına efektif verim denir. İş veya güç oranları şeklinde yazılırsa,

$$\eta_c = \frac{W_e}{Q_y} = \frac{W_e/t}{Q_y/t} = \frac{P_e}{m_y \cdot H_u} \quad 2.11$$

Bağıntıda bilinen değerler yerine yazılarak,

$$\eta_c = \frac{1}{b_c \cdot 10^{-3} / 3600 \cdot H_u} = \frac{3,6 \cdot 10^6}{b_c \cdot H_u} \quad 2.12$$

eşitliği elde edilir.

Benzin ve hidrojenin alt ısıl değerleri,

$$H_{ug} = 44100 \text{ kJ/kg}$$

$$H_{uh} = 120\,000 \text{ kJ/kg' dır.}$$

Bilinen bu değerler kullanılarak benzin hidrojen karışımlarının alt ısıl değerleri aşağıdaki bağıntı ile hesaplanabilir.

$$H_{uk} = [(m_g \cdot 0,775 \cdot 10^3 \cdot 44100) + (m_h \cdot 83,764 \cdot 10^3 \cdot 120000)] / (m_g + m_h) \cdot \rho_k \quad 2.13$$

2.3.6. Hava-Yakıt Oranı

Ölçülen hava tüketim miktarı ve 2.8 eşitliği ile bulunan saatlik yakıt tüketimi değerleri kullanılarak,

$$m_{hava} / B_k \quad \text{kgH/kgY,} \quad 2.14$$

bağıntısı ile hesaplanır.

2.3.7. Teorik Hava Miktarı,

Her yakıtın kimyasal yapısına bağlı olarak tam yanmasını sağlayacak teorik bir hava miktarı vardır. Birim ağırlıkta yakıtı yakmak için gerekli olan bu miktara kimyasal olarak doğru veya stokiyometrik hava miktarı adı verilir.

Benzin için teorik hava miktarı,

$$m_{thg} = 14,88 \text{ kgH/kgY}$$

Hidrojen için teorik hava miktarı,

$$M_{thh} = 34,5 \text{ kgH/kgY}$$

Benzin ve hidrojenin yanması için gerekli teorik hava miktarından hareketle karışım için gerekli teorik hava miktarı,

$$m_{thk} = [(m_g \cdot \rho_g \cdot 14,88) + (m_h \cdot \rho_h \cdot 34,5)] / [(m_g + m_h) \cdot \rho_k] \quad 2.15$$

bağıntısı ile hesaplanır.

2.3.8. Hava Fazlalık Katsayısı, α

DeneySEL çalışmalarda birim yakıt için kullanılan hava miktarının, aynı şartlarda birim yakıt için teorik olarak gerekli hava miktarına oranı olarak tarif edilir. Motorlar özelliklerine göre ve çalışma şartlarına bağlı olarak çok değişik hava-yakıt oranlarında çalışırlar. Buna göre hava fazlalık katsayısı;

$$\alpha = (m_{hava} / m_y)_g / (m_{hava} / m_y)_t \quad \text{veya,}$$

$$\alpha = (m_{hava} / m_y)_g / m_{thk} \quad 2.16$$

Burada,

m_{hava} : Hava tüketim miktarı, kgH/sn

m_y : Yakıt tüketim miktarı, kgY/sn

Hidrojen benzin karışımı için bu katsayı,

$$\alpha = \frac{m_{hava}}{m_g \cdot m_{thg} + m_{hava} \cdot m_{thh}} \quad 2.17$$

şeklini alır.

2.3.9. Volumetrik Verim, η_v

Volumetrik verim bir motorun belirli çalışma koşulları altında emdiği (gerçek) hava miktarının, aynı çalışma şartları altında emmesi gereken (teorik) hava miktarına oranı olarak tanımlanır.

$$\eta_v = m_{hava} / m_{thv}$$

2.18

Burada,

m_{hava} : Tüketilen gerçek hava miktarı, kgH/sn

m_{thv} : Volumetrik olarak gerekli teorik hava miktarı (motor devrine bağlı olarak silindirlerin dolması için gerekli hava miktarı), kgH/sn

Toplam silindir hacmi V_D (cm^3) olan bir motorun, n (dev/sn) hızla dönerken teorik olarak emmesi gereken hava miktarı;

$$m_{thv} = \rho_{hava} \cdot V_D \cdot (n/2)$$

2.19

Burada,

ρ_{hava} : Havanın yoğunluğudur.

Tüm bunlara göre,

$$\eta_v = \frac{2 \cdot m_{hava}}{\rho_{hava} \cdot V_D \cdot n}$$

2.20

şeklini alır. Bağlantıda yer alan;

V_D : Toplam silindir hacmi ($1,996 \cdot 10^3 \text{ m}^3$)

n : Devir sayısı (dev/sn)'dir.

2.3.10. Yakıt Enerjisi, Q_y (kW)

Motor çalışma sırasında gerekli enerjinin tamamını yakıt enerjisinden temin eder. Birim zamanda tüketilen yakıt miktarı bilindiğine göre yakıtın sahip olduğu enerji,

$$Q_v = m_y \cdot H_u \quad 2.21$$

ifadesi ile verilir. Burada,

m_y : Birim zamanda tüketilen yakıt miktarıdır.

Benzinle yapılan çalışmalarda $m_y = m_g$

Karışımla yapılan çalışmalarda $m_y = m_g + m_h$

H_u : Yakıtın alt ısı değeri, MJ/kg Karışımla yapılan çalışmalarda karışımın H_{uk} değeri karışımın alt ısı değeri olarak (3.11) bağıntısı ile verilmiştir.

2.3.11. Soğutma Suyu İle Atılan Enerji, Q_s (kW)

Soğutma suyu ile atılan enerji şekil 2.5'de görülen orofis-manometre düzeneği vasıtası ile Bernoulli denklemi ve manometre prensibinden faydalanılarak türetilen aşağıdaki ifade ile hesaplanacaktır.

$$m_s = 0.915 \cdot h^{0.5} \quad 2.22$$

h : Cıvalı manometreden okunan yükselti farkı, (mm H₂O)

Bu durumda soğutma suyu ile atılan enerji,

$$Q_s = m_s \cdot c_s \cdot (T_6 - T_5) \quad 2.23$$

denklemleri ile ifade edilir. Burada,

c_s : Soğutma suyunun özgül ısısı, (4.185 kJ/kg K)

T_6 : Soğutma suyu motor çıkış sıcaklığı, (K)

T_5 : Soğutma suyu motor giriş sıcaklığı, (K)

2.3.12. Egzoz Gazları İle Atılan Enerji, Q_e (kW)

Egzoz gazları ile atılan enerji miktarının tespit edilebilmesi için egzoz sistemi üç bölümde incelenecektir.

- 1- Egzoz manifoldu ile egzoz gaz kalorimetresi arası ısı kaybı
- 2- Egzoz gaz kalorimetresindeki ısı kaybı

- 3- Egzoz gaz kalorimetresi ile egzoz gazlarının atmosfere atıldığı yere kadar olan ısı kaybı.

Bu durumda atılan enerji miktarı aşağıdaki denklemle tespit edilebilir.

$$Q_c = m_{eg} \cdot c_{eg} \cdot (T_4 - T_7) + m_{eg} \cdot c_{eg} \cdot (T_7 - T_9) + m_{eg} \cdot c_{eg} \cdot (T_9 - T_1) \quad 2.24$$

Burada,

m_{eg} : Egzoz gazı debisi, (kg/sn)

c_{eg} : Egzoz gazı özgül ısısı, (kJ/kgK)

T_1 : Ortam sıcaklığı, (K)

T_4 : Egzoz manifoldu girişinde egzoz gaz sıcaklığı, (K)

T_7 : Kalorimetre girişinde egzoz gaz sıcaklığı. (K)

T_9 : Kalorimetre çıkışında egzoz gaz sıcaklığı. (K)

Kalorimetredeki ısı denge göz önüne alındığında,

$$m_{eg} \cdot c_{eg} \cdot (T_7 - T_9) = m_s \cdot c_s \cdot (T_{10} - T_8) \quad 2.25$$

Burada,

T_8 : Kalorimetre girişinde su sıcaklığı, (K)

T_{10} : Kalorimetre çıkışında su sıcaklığı, (K)

$$m_{eg} \cdot c_{eg} = \frac{m_s \cdot c_s \cdot (T_{10} - T_8)}{(T_7 - T_9)} \quad 2.26$$

Sonuçta genel denklem,

$$Q_c = \frac{m_s \cdot c_s \cdot (T_{10} - T_8)}{(T_7 - T_9)} (T_4 - T_7) + \frac{m_s \cdot c_s \cdot (T_{10} - T_8)}{(T_7 - T_9)} (T_7 - T_9) + \frac{m_s \cdot c_s \cdot (T_{10} - T_8)}{(T_7 - T_9)} (T_9 - T_1)$$

2.27 şeklini alır.

2.3.13. Kayıp Enerji (Işınım ve sürtünmeler yoluyla kaybolan enerji miktarı), Q_k (kW)

Motor milinden alınan enerji (P_e), soğutma suyuna giden enerji (Q_s) ve egzoz giden enerji (Q_e) bilindiğine göre kayıp enerji aşağıdaki ifade ile bulunabilir.

$$Q_k = Q_y - (P_e + Q_s + Q_e) \quad 2.28$$

2.3.14. Enerji Dağılım Oranları

Motor milinden güç olarak alınan faydalı enerji yüzdesi.

$$(P_e / Q_y) \times 100 \quad 2.29$$

Soğutma suyuna giden enerji yüzdesi,

$$(Q_s / Q_y) \times 100 \quad 2.30$$

Egzoz gazları ile atılan enerji yüzdesi,

$$(Q_e / Q_y) \times 100 \quad 2.31$$

Işınım ve sürtünmeler yoluyla atılan enerji yüzdesi.

$$(Q_k / Q_y) \times 100 \quad 2.32$$

2.4. Dencyin Yapılışı

Deney düzeneği, Erzurum Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Bölümü Enerji Laboratuvarında kurulmuştur. Deney yerinin genel özellikleri aşağıda verilmiştir.

| | |
|----------------------------------|-------|
| Deniz seviyesinden yükseklik (m) | 1950 |
| Bağıl Nem (%) | 40-48 |
| Ortam Sıcaklığı (°C) | 20-28 |
| Barometrik Basınç (mmHg) | 612 |

Şekil 3.1’de gösterilen deney düzeneği kurulduktan sonra, deneylere başlamadan önce güç ölçüm ünitesinde yer alan tüm ölçü aletleri kalibre edilmiştir. Moment göstergesi kalibrasyonu yapılırken öncelikle göstergenin potansiyometre yardımı ile sıfır ayarı yapılmıştır. Kalibrasyon kolu dinamometreye monte edilmiş ve denge ayarı yapılmıştır. Daha sonra kalibrasyon koluna 5 kg’lık ağırlıklar asılarak üretici firmanın hazırladığı aşağıdaki ampirik ifade ile ulaşılan değerler göstergeden okunan değerler ile karşılaştırılarak doğruluğu test edilmiştir.

$$\text{Yük} = (\text{Kalibrasyon ağırlığı} \times 9,81 \times A) / B \quad (\text{Nm}) \quad 2.33$$

A: Yükün uygulandığı kalibrasyon kolu uzunluğu

B: Yükleme hücresi kolu uzunluğu

Yakıt tüketimi ölçüm düzeneği kalibrasyonuna başlamadan önce cihaz yaklaşık 20 dakika çalıştırılmış, cihaz içerisinde sıcaklığının kararlı hale gelmesi sağlanmıştır. Ölçüm ünitesinde bulunan boru bağlantıları açılarak göstergenin 310 gr’lık maksimum ölçüm miktarını gösterene kadar yakıt kabı kurutulmuştur. Ölçüm kabına en fazla 300 gr’a kadar çeşitli ağırlıklarda kalibrasyon kütleleri konulmuş ve her seferinde gösterge ile karşılaştırılarak doğruluğu test edilmiştir.

Termokupllar ise sıcak su banyosuna yerleştirilen cıvalı termometre ve su banyosunun kendi dijital termokuplu yardımıyla okunan değer ile karşılaştırmalı olarak kalibre edilmiştir.

Deneylere başlamadan önce motor rölanti durumunda çalıştırılarak ısınması sağlanmıştır. Bir müddet sonra kapalı devre çalışan motor bloğu soğutma suyu 40 °C’ye ulaştığında soğutma işleminin başlaması için önceden ayarlanan termovalf otomatik olarak devreye girmekte ve bu noktadan sonra devir sayısı ve moment değerlerinde değişme olmamaktadır.

Bu durumda gaz pedali ¼ açıklık konumuna getirilmiş ve yüksüz olarak devir sayısı tespit edilmiştir. Daha sonra deneylere başlanmış, motor mili hidrolik frenle yüklenerek

değişik devir sayılarında moment ve diğer büyüklükler tespit edilmiştir. Aynı çalışma, $\frac{1}{2}$ ve $\frac{3}{4}$ gaz pedalı konumlarında da tekrarlanarak benzinle yapılan çalışmalar tamamlanmıştır.

İçten yanmalı motorlarda benzin-hava karışımına hidrojen ilavesinde, karışıma sabit miktarda hidrojen ilavesi ve sabit hidrojen/benzin aralığında çalışması olmak üzere iki farklı yöntem kullanılmıştır [23]. Hidrojen miktarını benzinle orantılı bir şekilde motora gönderme imkanı olmadığı için çalışmalarımızda sabit miktarda hidrojen ilavesi yöntemi kullanılmıştır.

Benzin-hidrojen karışımı ile yapılan çalışmalarda da motorun normal çalışma sıcaklığına kadar ısınması beklenilmiştir. Bu koşullar sağlandıktan sonra benzinle yapılan çalışmalarda olduğu gibi $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{2}$ ve $\frac{3}{4}$ gaz pedalı konumlarında denemeler benzine hidrojen ilave edilerek tekrarlanmıştır. Gaz pedalı konumunun saf benzinle yapılan çalışmalarla aynı olmasını temin etmek için devir sayıları karşılaştırılmış ve daha sonra motora hidrojen vermeye başlanmıştır. Benzinle yapılan çalışmalardaki aynı motor devirlerinde çok tekrarlı olarak ölçümler yeniden yapılmıştır.

Gönderilen hidrojen, kısılan ana hava yoluna bağlı olarak azalan benzin miktarını karşılayacak şekilde manuel olarak hidrojen akış-ölçeri üzerindeki vana ile ayarlanmıştır.

Her bir gaz pedalı konumu için bir çok farklı hidrojen-benzin karışımı motora sevk edilmiş ve ölçümler tekrarlanmıştır. Ancak deney sonuçlarının sunulduğunda optimum çalışma şartlarının daha iyi gözlenebilmesi için üç farklı karışımdan elde edilen sonuçlara yer verilmiştir.

Tam gaz konumunda emme manifoldu basıncı 1 atm'in üzerine çıkması sayesinde emme manifoldundan verilen hidrojenin kolayca hava hızı ölçümünde kullanılan tanka dolması ve bu durumda ortaya çıkacak patlama tehlikesinden dolayı bu gaz pedalı açıklık oranında çalışma yapılmamıştır.

3. SONUÇLAR

Bölüm 2.4'te anlatıldığı şekilde yapılan deneylerden elde edilen veriler, bölüm 2.3'te açıklanan hesap yöntemleri kullanılarak tablolar halinde verilmiştir. Tablolar gaz kelebeği konumlarına bağlı olarak birbirlerini tamamlayacak ve karşılaştırmada kolaylık sağlayacak şekilde gruplandırılmıştır. Her gaz kelebeği konumu için oluşturulan grupta ilk olarak benzin, daha sonra benzin-hidrojen karışımlarından elde edilen elde edilen veriler sunulmuş böylece dört adet ölçüm ve dört adet gerekli hesaplamaların yapılmış motor karakteristikleri tablosu verilmiştir. Ölçüm tablolarında devir sayısı, moment, tüketilen benzin miktarı, sıcaklıklar, hava hızı, soğutma suyu debisi hesabında kullanılan manometre yükseltisi ve CO ve HC emisyon değerleri; motor karakteristikleri tablolarında ise tüketilen hidrojen miktarının benzin miktarına oranı, efektif güç, efektif verim, ortalama efektif basınç, özgül yakıt tüketimi, hava fazlalık katsayısı, volumetrik verim, enerji dağılım değerleri ve enerji dağılım oranları sunulmuştur.

Her gaz kelebeği için oluşturulan grubun ardından motor karakteristiklerinin devir sayısı ile değişimleri grafikler halinde verilmiş, ayrıca bu karakteristiklerin ortalamaları değerlendirilmiştir. Ardından enerji dağılım değerleri pasta grafikleri ile sunulmuştur.

En sonda ise CO ve HC emisyonlarının devir sayısı ile değişimleri grafik olarak verilmiş ve değerlendirilmiştir.

Motor karakteristiklerinin ve ilgili büyüklüklerin hesaplanmasında ve motor karakteristiklerinin büyüklüklerini gösteren grafiklerin çiziminde Windiws'98 paket programı altında çalışan Excell'2000 paket programı kullanılmıştır.

Tablo 3.1 ¼ Gaz konumu, saf benzin ölçüm tablosu

| n (d/dak) | M _d (Nm) | m _g (g/s) | T ₁ (°C) | T ₂ (°C) | T ₃ (°C) | T ₄ (°C) | T ₅ (°C) | T ₆ (°C) | T ₇ (°C) | T ₈ (°C) | T ₉ (°C) | T ₁₀ (°C) | V _{hava} (m/s) | h (mm) | CO %Hac | HC %Hac |
|--------------|------------------------|-------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|-------------------------|----------------------------|-----------|------------|------------|
| 942 | 95 | 0,664 | 26 | 26 | 41 | 168 | 40,1 | 42 | 75 | 17 | 18 | 22 | 1,54 | 4 | 1,56 | 518 |
| 1108 | 93 | 0,688 | 26 | 26 | 41 | 182 | 40,7 | 42,6 | 91 | 17 | 19 | 23 | 1,55 | 5 | 1,58 | 506 |
| 1250 | 90 | 0,700 | 26 | 26 | 42 | 209 | 40,9 | 42,9 | 105 | 17 | 20 | 23 | 1,55 | 6 | 1,87 | 495 |
| 1400 | 85 | 0,713 | 27 | 26 | 42 | 222 | 41,3 | 43,2 | 113 | 17 | 20 | 23 | 1,56 | 7,5 | 1,68 | 478 |
| 1546 | 78 | 0,726 | 27 | 26 | 43 | 251 | 41,4 | 43,4 | 121 | 17 | 20 | 24 | 1,57 | 9 | 1,7 | 460 |
| 1704 | 70 | 0,726 | 27 | 26 | 43 | 255 | 41,5 | 43,6 | 132 | 17 | 21 | 24 | 1,57 | 11 | 1,78 | 451 |
| 1833 | 64 | 0,726 | 27 | 27 | 43 | 261 | 41,7 | 43,6 | 140 | 17 | 22 | 25 | 1,57 | 13 | 1,87 | 421 |
| 2015 | 55 | 0,740 | 27 | 27 | 43 | 266 | 41,8 | 43,8 | 147 | 17 | 24 | 26 | 1,57 | 15,5 | 1,66 | 404 |

Tablo 3.2. ¼ Gaz konumu, saf benzin motor karakteristikleri tablosu

| P _e (kW) | η _e | P _{me} (Mpa) | b _e (g/kWh) | α | η _v | Q _y (kW) | Q _s (kW) | Q _e (kW) | Q _k (kW) | Q _s /Q _y | Q _e /Q _y | Q _k /Q _y |
|------------------------|----------------|--------------------------|---------------------------|-------|----------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| 9.37 | 0,32 | 0,665 | 254,995 | 1,025 | 0,544 | 29,21 | 3,48 | 8,68 | 7,68 | 0,12 | 0,30 | 0,26 |
| 10.79 | 0,36 | 0,651 | 229,363 | 0,996 | 0,466 | 30,25 | 3,89 | 9,06 | 6,52 | 0,13 | 0,30 | 0,22 |
| 11.78 | 0,38 | 0,630 | 213,904 | 0,978 | 0,413 | 30,80 | 4,48 | 9,00 | 5,54 | 0,15 | 0,29 | 0,18 |
| 12.46 | 0,40 | 0,595 | 205,965 | 0,963 | 0,371 | 31,37 | 4,76 | 8,76 | 5,38 | 0,15 | 0,28 | 0,17 |
| 12.63 | 0,40 | 0,546 | 207,088 | 0,952 | 0,338 | 31,96 | 5,49 | 10,82 | 3,03 | 0,17 | 0,34 | 0,09 |
| 12.49 | 0,39 | 0,490 | 209,359 | 0,952 | 0,307 | 31,96 | 6,37 | 10,02 | 3,08 | 0,20 | 0,31 | 0,10 |
| 12.28 | 0,38 | 0,448 | 212,871 | 0,952 | 0,285 | 31,96 | 6,27 | 11,05 | 2,36 | 0,20 | 0,35 | 0,07 |
| 11,61 | 0,36 | 0,385 | 229,664 | 0,934 | 0,259 | 32,58 | 7,20 | 12,18 | 1,58 | 0,22 | 0,37 | 0,05 |

Tablo 3.3. ¼ Gaz konumu, benzin-hidrojen karışımı ölçüm tablosu($m_h=12,296 \times 10^{-6}$ kg/s)

| n (d'dak) | M_d (Nm) | m_g (g/s) | T_1 °C | T_2 °C | T_3 °C | T_4 °C | T_5 °C | T_6 °C | T_7 °C | T_8 °C | T_9 °C | T_{10} °C | V_{hava} (m/s) | h (mm) | CO %o Hac | HC %o Hac |
|--------------|---------------|----------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|----------------|---------------------|-----------|--------------|--------------|
| 951 | 93 | 0,535 | 27 | 26 | 45 | 159 | 40,3 | 42 | 64 | 17 | 18 | 21 | 1,54 | 4 | 1,31 | 478 |
| 1099 | 93 | 0,592 | 27 | 26 | 44 | 172 | 40,4 | 42 | 82 | 17 | 18 | 22 | 1,55 | 5 | 1,37 | 471 |
| 1245 | 89 | 0,611 | 27 | 26 | 44 | 201 | 40,8 | 42,5 | 96 | 17 | 19 | 22 | 1,55 | 6 | 1,52 | 452 |
| 1410 | 81 | 0,626 | 28 | 26 | 44 | 213 | 41,1 | 43 | 108 | 17 | 20 | 23 | 1,56 | 7,5 | 1,55 | 432 |
| 1545 | 76 | 0,631 | 28 | 26 | 45 | 241 | 41,3 | 43 | 117 | 17 | 20 | 24 | 1,57 | 9 | 1,48 | 426 |
| 1706 | 68 | 0,621 | 28 | 26 | 46 | 248 | 41,5 | 43,2 | 126 | 17 | 21 | 24 | 1,57 | 11 | 1,72 | 421 |
| 1849 | 60 | 0,611 | 28 | 27 | 47 | 256 | 41,7 | 43,4 | 138 | 17 | 21 | 25 | 1,57 | 13 | 1,86 | 405 |
| 2022 | 52 | 0,592 | 28 | 27 | 48 | 259 | 41,9 | 43,6 | 149 | 17 | 22 | 25 | 1,58 | 15,5 | 1,46 | 375 |

Tablo 3.4. ¼ Gaz konumu, benzin-hidrojen karışımı motor karakteristikleri tablosu($m_h=12,296 \times 10^{-6}$ kg/s)

| m_h/m_g (x 100) | P_e (kW) | η_e | P_{me} (Mpa) | b_e (g kWh) | α | η_v | Q_y (kW) | Q_s (kW) | Q_e (kW) | Q_k (kW) | Q_s/Q_y | Q_e/Q_y | Q_k/Q_y |
|----------------------|---------------|----------|-------------------|------------------|----------|----------|---------------|---------------|---------------|---------------|-----------|-----------|-----------|
| 2.424 | 9,26 | 0,37 | 0,651 | 212,883 | 1,238 | 0,539 | 25,08 | 3,11 | 8,00 | 4,71 | 0,12 | 0,32 | 0,19 |
| 2,188 | 10,70 | 0,39 | 0,651 | 203,583 | 1,128 | 0,470 | 27,62 | 3,27 | 7,89 | 5,75 | 0,12 | 0,29 | 0,21 |
| 2,121 | 11,60 | 0,41 | 0,623 | 193,620 | 1,094 | 0,415 | 28,44 | 3,81 | 7,87 | 5,16 | 0,13 | 0,28 | 0,18 |
| 2.070 | 11,96 | 0,41 | 0,567 | 192,334 | 1,071 | 0,368 | 29,10 | 4,76 | 8,79 | 3,59 | 0,16 | 0,30 | 0,12 |
| 2,054 | 12,30 | 0,42 | 0,532 | 188,578 | 1,070 | 0,338 | 29,33 | 4,67 | 10,71 | 1,65 | 0,16 | 0,37 | 0,06 |
| 2,087 | 12,15 | 0,42 | 0,476 | 187,857 | 1,087 | 0,306 | 28,88 | 5,16 | 10,22 | 1,35 | 0,18 | 0,35 | 0,05 |
| 2,121 | 11,62 | 0,41 | 0,420 | 193,384 | 1,104 | 0,283 | 28,44 | 5,61 | 10,86 | 0,36 | 0,20 | 0,38 | 0,01 |
| 2,188 | 11,01 | 0,40 | 0,364 | 197,896 | 1,146 | 0,260 | 27,62 | 6,12 | 10,14 | 0,34 | 0,22 | 0,37 | 0,01 |

Tablo 3.5. ¼ Gaz konumu, benzin-hidrojen karışımı ölçüm tablosu $(m_h=19,19 \times 10^{-6} \text{ kg/s})$

| n (d/dak) | M_d (Nm) | m_g (g/s) | T_1 (°C) | T_2 (°C) | T_3 (°C) | T_4 (°C) | T_5 (°C) | T_6 (°C) | T_7 (°C) | T_8 (°C) | T_9 (°C) | T_{10} (°C) | V_{hava} (m/s) | h (mm) | CO % Hac | HC % Hac |
|--------------|---------------|----------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|------------------|---------------------|-----------|-------------|-------------|
| 950 | 92 | 0,470 | 27 | 26 | 44 | 151 | 41,7 | 43 | 57 | 17 | 21 | 20 | 1,54 | 4 | 1,54 | 508 |
| 1102 | 92 | 0,500 | 27 | 26 | 44 | 164 | 41,8 | 43 | 75 | 17 | 21 | 21 | 1,55 | 5 | 1,55 | 510 |
| 1239 | 89 | 0,513 | 28 | 26 | 44 | 193 | 41,9 | 43,2 | 88 | 17 | 21 | 21 | 1,56 | 6 | 1,7 | 492 |
| 1400 | 82 | 0,527 | 28 | 26 | 45 | 205 | 42 | 43,3 | 100 | 17 | 21 | 21 | 1,56 | 7,5 | 1,6 | 473 |
| 1550 | 74 | 0,513 | 28 | 26 | 45 | 230 | 42,3 | 43,6 | 109 | 17 | 21 | 21 | 1,57 | 9 | 1,51 | 452 |
| 1695 | 69 | 0,494 | 28 | 27 | 47 | 235 | 42,5 | 43,8 | 113 | 17 | 22 | 21 | 1,57 | 11 | 1,56 | 441 |
| 1839 | 61 | 0,487 | 28 | 27 | 47 | 243 | 42,7 | 44 | 133 | 17 | 22 | 22 | 1,58 | 13 | 1,66 | 415 |
| 2021 | 51 | 0,481 | 28 | 27 | 47 | 253 | 42,7 | 44 | 142 | 17 | 22 | 23 | 1,58 | 15,5 | 1,3 | 400 |

Tablo 3.6. ¼ Gaz konumu, benzin-hidrojen motor karakteristikleri tablosu $(m_h=19,19 \times 10^{-6} \text{ kg/s})$

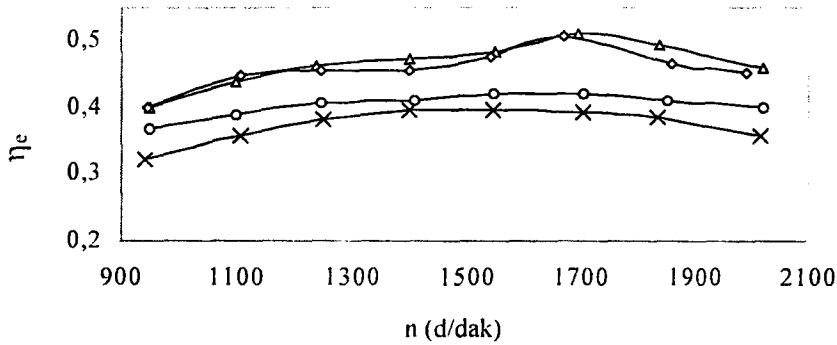
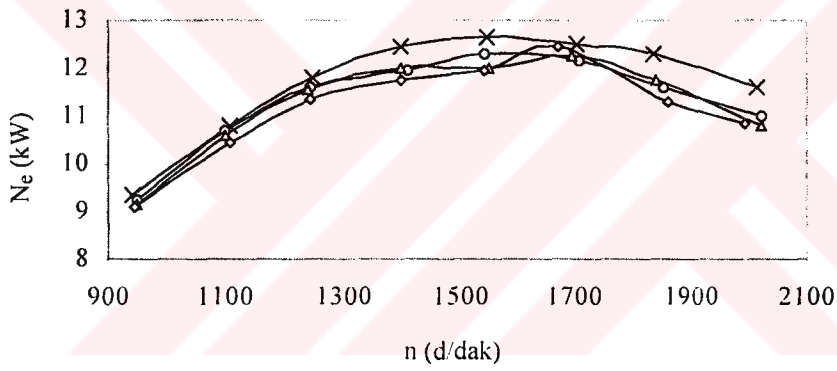
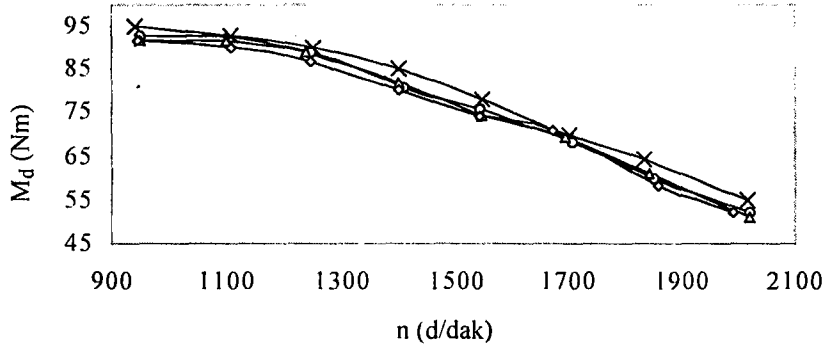
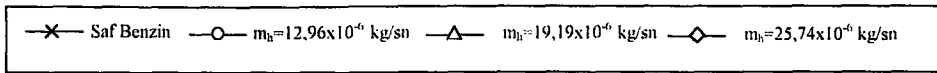
| m_h/m_g (x 100) | P_e (kW) | η_e | P_{me} (MPa) | b_e (g/kWh) | α | η_v | Q_y (kW) | Q_s (kW) | Q_e (kW) | Q_k (kW) | Q_s/Q_y | Q_e/Q_y | Q_k/Q_y |
|----------------------|---------------|----------|-------------------|------------------|----------|----------|---------------|---------------|---------------|---------------|-----------|-----------|-----------|
| 4,087 | 9,15 | 0,40 | 0,644 | 192,224 | 1,388 | 0,540 | 22,96 | 2,38 | 7,20 | 4,23 | 0,10 | 0,31 | 0,18 |
| 3,838 | 10,62 | 0,44 | 0,644 | 176,048 | 1,315 | 0,468 | 24,30 | 2,46 | 7,07 | 4,16 | 0,10 | 0,29 | 0,17 |
| 3,738 | 11,55 | 0,46 | 0,623 | 166,017 | 1,286 | 0,419 | 24,89 | 2,91 | 6,86 | 3,57 | 0,12 | 0,28 | 0,14 |
| 3,639 | 12,02 | 0,47 | 0,574 | 163,679 | 1,253 | 0,371 | 25,51 | 3,26 | 6,24 | 3,99 | 0,13 | 0,24 | 0,16 |
| 3,738 | 12,01 | 0,48 | 0,518 | 159,606 | 1,294 | 0,337 | 24,89 | 3,57 | 6,40 | 2,91 | 0,14 | 0,26 | 0,12 |
| 3,888 | 12,25 | 0,51 | 0,483 | 150,725 | 1,344 | 0,308 | 24,02 | 3,95 | 6,34 | 1,49 | 0,16 | 0,26 | 0,06 |
| 3,938 | 11,75 | 0,49 | 0,427 | 155,228 | 1,369 | 0,286 | 23,75 | 4,29 | 6,75 | 0,96 | 0,18 | 0,28 | 0,04 |
| 3,988 | 10,79 | 0,46 | 0,357 | 166,913 | 1,386 | 0,260 | 23,48 | 4,68 | 7,84 | 0,16 | 0,20 | 0,33 | 0,01 |

Tablo 3.7. ¼ Gaz konumu, benzin-hidrojen karışımı ölçüm tablosu $(m_h=25,74 \times 10^{-6} \text{ kg/s})$

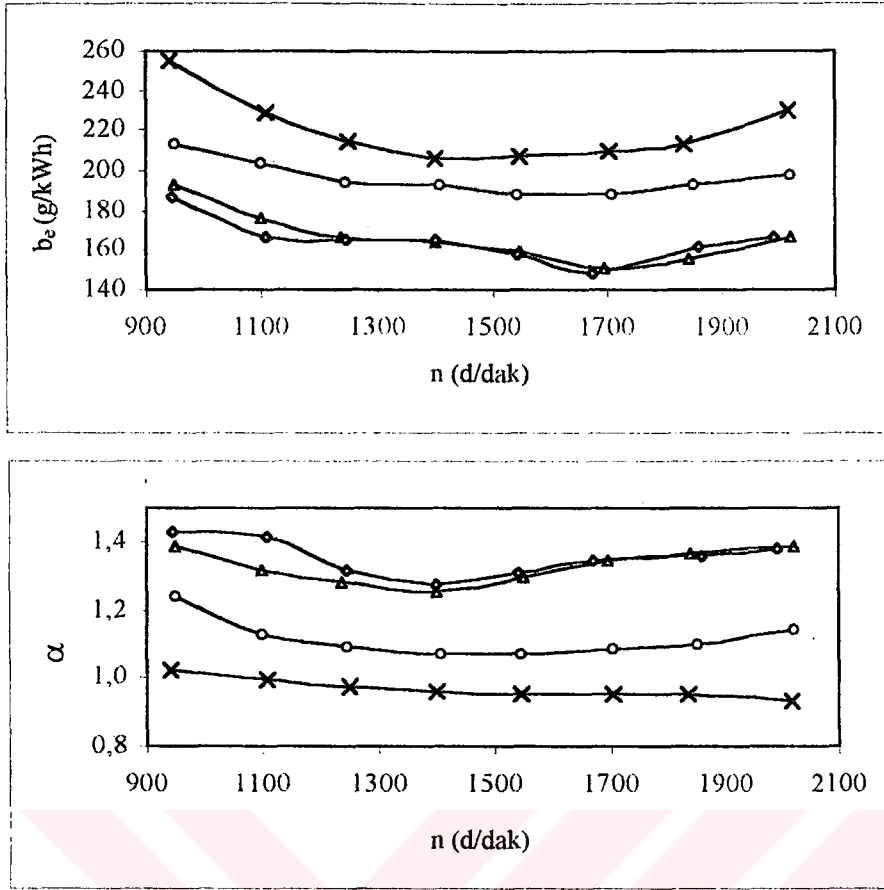
| n (d/dak) | M_d (Nm) | m_g (g/s) | T_1 (°C) | T_2 (°C) | T_3 (°C) | T_4 (°C) | T_5 (°C) | T_6 (°C) | T_7 (°C) | T_8 (°C) | T_9 (°C) | T_{10} (°C) | V_{hava} (m/s) | h (mm) | CO % Hac | HC % Hac |
|-----------|---------------|----------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|------------------|---------------------|-----------|-------------|-------------|
| 944 | 92 | 0,448 | 28 | 26 | 44 | 150 | 42 | 43 | 59 | 17 | 20 | 20 | 1,54 | 4 | 1,68 | 525 |
| 1108 | 90 | 0,458 | 28 | 26 | 44 | 162 | 42,1 | 43 | 73 | 17 | 20 | 20 | 1,56 | 5 | 1,37 | 510 |
| 1245 | 87 | 0,494 | 28 | 26 | 44 | 190 | 42,3 | 43,2 | 85 | 17 | 21 | 20 | 1,56 | 6 | 1,72 | 500 |
| 1400 | 80 | 0,513 | 28 | 26 | 45 | 200 | 42,5 | 43,5 | 96 | 17 | 21 | 21 | 1,57 | 7,5 | 1,67 | 485 |
| 1543 | 74 | 0,500 | 28 | 26 | 45 | 224 | 42,7 | 43,8 | 104 | 17 | 21 | 21 | 1,57 | 9 | 1,95 | 464 |
| 1672 | 71 | 0,487 | 28 | 26 | 45 | 230 | 42,8 | 43,8 | 108 | 17 | 22 | 22 | 1,57 | 11 | 2,2 | 457 |
| 1859 | 58 | 0,481 | 28 | 26 | 46 | 235 | 42,8 | 43,9 | 120 | 17 | 22 | 22 | 1,57 | 13 | 2,34 | 418 |
| 1992 | 52 | 0,475 | 28 | 27 | 47 | 247 | 42,8 | 44 | 128 | 17 | 22 | 23 | 1,58 | 15,5 | 2,3 | 407 |

Tablo 3.8. ¼ Gaz konumu, benzin-hidrojen karışımı motor karakteristikleri tablosu $(m_h=25,74 \times 10^{-6} \text{ kg/s})$

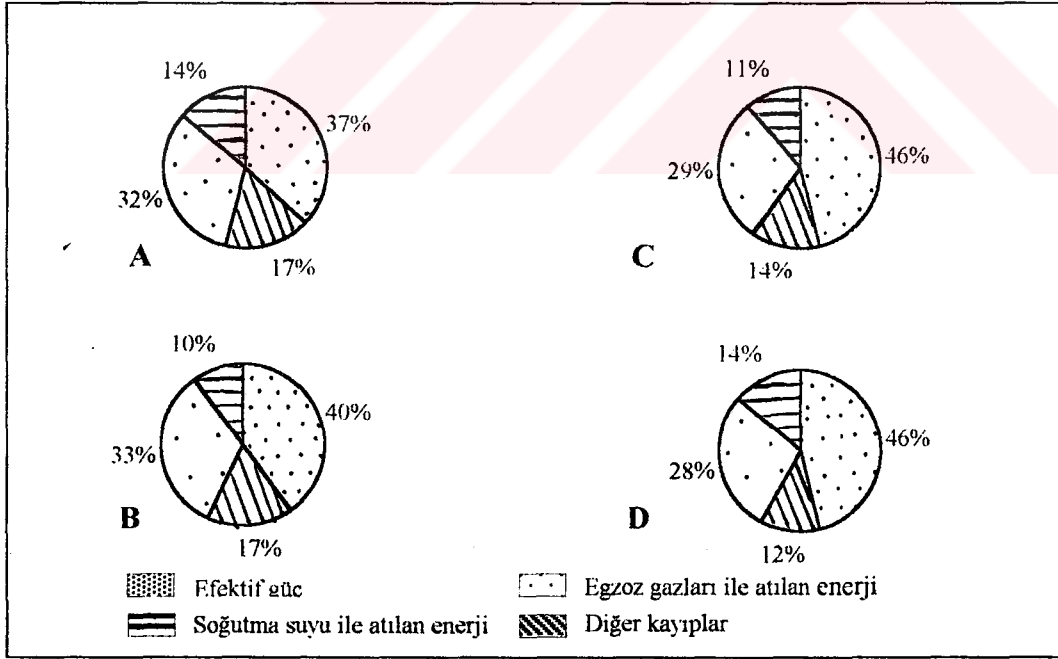
| m_h/m_g (x 100) | P_e (kW) | η_e | P_{me} (MPa) | b_e (g/kWh) | α | η_v | Q_y (kW) | Q_s (kW) | Q_e (kW) | Q_k (kW) | Q_s/Q_y | Q_e/Q_y | Q_k/Q_y |
|----------------------|---------------|----------|-------------------|------------------|----------|----------|---------------|---------------|---------------|---------------|-----------|-----------|-----------|
| 5,750 | 9,09 | 0,40 | 0,644 | 187,394 | 1,428 | 0,543 | 22,79 | 1,83 | 6,54 | 5,32 | 0,08 | 0,29 | 0,23 |
| 5,616 | 10,44 | 0,45 | 0,630 | 166,879 | 1,414 | 0,469 | 23,26 | 1,84 | 5,28 | 5,69 | 0,08 | 0,23 | 0,24 |
| 5,215 | 11,34 | 0,46 | 0,609 | 164,827 | 1,318 | 0,417 | 24,81 | 2,02 | 5,29 | 6,16 | 0,08 | 0,21 | 0,25 |
| 5,014 | 11,73 | 0,46 | 0,560 | 165,464 | 1,278 | 0,373 | 25,68 | 2,51 | 6,39 | 5,05 | 0,10 | 0,25 | 0,20 |
| 5,148 | 11,96 | 0,48 | 0,518 | 158,288 | 1,311 | 0,339 | 25,09 | 3,02 | 6,58 | 3,53 | 0,12 | 0,26 | 0,14 |
| 5,282 | 12,43 | 0,51 | 0,497 | 148,582 | 1,343 | 0,313 | 24,53 | 3,03 | 8,18 | 0,88 | 0,12 | 0,33 | 0,04 |
| 5,349 | 11,29 | 0,47 | 0,406 | 161,646 | 1,359 | 0,281 | 24,26 | 3,63 | 7,36 | 1,99 | 0,15 | 0,30 | 0,08 |
| 5,415 | 10,85 | 0,45 | 0,364 | 166,288 | 1,384 | 0,264 | 24,00 | 4,32 | 8,64 | 0,20 | 0,18 | 0,36 | 0,01 |



Şekil 3.1. $\frac{1}{4}$ Gaz konumunda moment, efektif güç ve efektif verimin devir sayısı ile değişimi



Şekil 3.2. ¼ Gaz konumunda özgül yakıt tüketimi ve hava fazlalık katsayısının devir sayısı ile değişimi



Şekil 3.3. ¼ Gaz konumunda enerji dağılım oranları

A: Saf benzin

B: $m_h = 12,96 \times 10^{-6} \text{ kg/sn}$

C: $m_h = 19,19 \times 10^{-6} \text{ kg/sn}$

D: $m_h = 25,74 \times 10^{-6} \text{ kg/sn}$

- ¼ Gaz pedalı konumunda yapılan çalışmalarda efektif verimin ortalama değeri %37; $12,96 \times 10^{-6}$ kg/s hidrojen ilave edildiğinde % 40; $19,19 \times 10^{-6}$ kg/s hidrojen ilave edildiğinde % 46; $25,74 \times 10^{-6}$ kg/s hidrojen ilave edildiğinde ise % 46 olduğu gözlenmiştir.
- Benzinle yapılan çalışmalarda α (hava fazlalık katsayısı) ortalama değeri 0,97 olurken, bu değer $12,96 \times 10^{-6}$ kg/s hidrojen ilavesi ile 1,12; $19,19 \times 10^{-6}$ kg/s hidrojen ilavesi ile 1,33; $25,74 \times 10^{-6}$ kg/s hidrojen ilavesi ile 1,35'e kadar değişmiştir.
- Benzinle yapılan çalışmalarda özgül yakıt tüketimi ortalama değeri 220,4 g/kWh olurken; $12,96 \times 10^{-6}$ kg/s hidrojen ilave edildiğinde 196,26 g/kWh; $19,19 \times 10^{-6}$ kg/s hidrojen ilave edildiğinde 166,31 g/kWh; $25,74 \times 10^{-6}$ kg/s hidrojen ilave edildiğinde 164,92 g/kWh değerine düşmüştür.
- $12,96 \times 10^{-6}$ kg/s hidrojen ilave edildiğinde motora sevk edilen hidrojen debisinin benzin debisine oranı ortalama olarak % 2,15 olarak gözlenirken; $19,19 \times 10^{-6}$ kg/s hidrojen ilavesi ile % 3,85; $25,74 \times 10^{-6}$ kg/s hidrojen ilavesi ile % 5,35 olduğu görülmüştür.

Tablo 3.9. ½ Gaz konumu, saf benzin ölçüm tablosu

| n (d/dak) | m _d (Nm) | m _g (g/s) | T ₁ (°C) | T ₂ (°C) | T ₃ (°C) | T ₄ (°C) | T ₅ (°C) | T ₆ (°C) | T ₇ (°C) | T ₈ (°C) | T ₉ (°C) | T ₁₀ (°C) | V _{hava} (m/s) | h (mm) | CO (°C) | HC (°C) |
|--------------|------------------------|-------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|-------------------------|----------------------------|-----------|------------|------------|
| 995 | 125 | 0,963 | 23 | 22 | 50 | 350 | 41,2 | 43,1 | 121 | 16 | 18 | 22 | 1,89 | 8 | 1,33 | 446 |
| 1198 | 124 | 1,100 | 23 | 22 | 45 | 362 | 41,3 | 43,2 | 129 | 16 | 18 | 23 | 2,22 | 10 | 1,44 | 441 |
| 1415 | 120 | 1,167 | 23 | 22 | 45 | 376 | 41,4 | 43,4 | 137 | 16 | 20 | 24 | 2,46 | 11 | 1,45 | 392 |
| 1607 | 118 | 1,242 | 23 | 22 | 46 | 389 | 41,9 | 43,8 | 144 | 16 | 22 | 26 | 2,65 | 13 | 1,46 | 376 |
| 1798 | 113 | 1,242 | 24 | 22 | 43 | 401 | 42,3 | 44,4 | 156 | 16 | 22 | 27 | 2,89 | 15 | 1,57 | 370 |
| 1998 | 110 | 1,328 | 24 | 22 | 50 | 410 | 42,5 | 44,4 | 162 | 16 | 24 | 27 | 2,91 | 20 | 1,68 | 343 |
| 2210 | 105 | 1,426 | 24 | 22 | 52 | 421 | 42,6 | 44,5 | 175 | 16 | 27 | 29 | 2,93 | 23 | 1,76 | 329 |
| 2404 | 100 | 1,540 | 24 | 22 | 53 | 435 | 42,7 | 44,7 | 182 | 16 | 31 | 31 | 2,95 | 26 | 1,88 | 319 |
| 2594 | 98 | 1,674 | 25 | 23 | 53 | 452 | 43 | 45,1 | 196 | 16 | 36 | 34 | 2,98 | 30 | 1,88 | 317 |
| 2814 | 95 | 1,833 | 25 | 23 | 53 | 476 | 43,2 | 45,1 | 203 | 16 | 39 | 36 | 3,01 | 35 | 1,82 | 312 |
| 3010 | 92 | 2,026 | 25 | 23 | 53 | 491 | 43,3 | 45,2 | 210 | 16 | 41 | 39 | 3,05 | 37 | 1,8 | 309 |

Tablo 3.10. ½ Gaz konumu, saf benzin motor karakteristikleri tablosu

| P _c (kW) | η _e | P _{me} (MPa) | b _e (g/kWh) | α | η _v | Q _y (kW) | Q _s (kW) | Q _e (kW) | Q _k (kW) | Q _e /Q _y | Q _s /Q _y | Q _k /Q _y |
|------------------------|----------------|--------------------------|---------------------------|-------|----------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| 13.02 | 0,31 | 0.875 | 266,037 | 0.876 | 0.633 | 42.35 | 4.92 | 13.27 | 11,14 | 0,31 | 0,12 | 0.26 |
| 15.56 | 0,32 | 0.868 | 254,559 | 0.901 | 0.617 | 48.40 | 5.50 | 14.89 | 12,45 | 0,31 | 0,11 | 0.26 |
| 17.78 | 0,35 | 0.840 | 236,202 | 0.941 | 0.579 | 51.33 | 6,07 | 16.82 | 10,67 | 0,33 | 0,12 | 0.21 |
| 19.86 | 0,36 | 0.826 | 225,152 | 0.952 | 0.549 | 54.65 | 6,27 | 20.90 | 7,62 | 0,38 | 0,11 | 0.14 |
| 21.28 | 0,39 | 0.791 | 210,138 | 1.035 | 0.535 | 54.65 | 7,44 | 21.56 | 4,37 | 0,39 | 0,14 | 0.08 |
| 23.02 | 0,39 | 0.770 | 207,658 | 0.975 | 0.485 | 58.41 | 7,77 | 21.43 | 6,19 | 0,37 | 0,13 | 0.11 |
| 24.30 | 0,39 | 0.735 | 211,246 | 0.914 | 0.441 | 62.74 | 8,34 | 24,29 | 5,81 | 0,39 | 0,13 | 0,09 |
| 25.17 | 0,37 | 0.700 | 220,222 | 0.852 | 0.409 | 67.76 | 9,33 | 28,44 | 4,81 | 0,42 | 0,14 | 0,07 |
| 26,62 | 0,36 | 0,686 | 226,366 | 0,789 | 0,383 | 73,65 | 10,52 | 33,47 | 3,04 | 0,45 | 0,14 | 0,04 |
| 27,99 | 0,35 | 0,665 | 235,759 | 0,728 | 0,356 | 80,67 | 10,29 | 38,32 | 4,07 | 0,47 | 0,13 | 0,05 |
| 29,00 | 0,33 | 0,644 | 251,551 | 0,667 | 0,337 | 89,16 | 10,57 | 44,18 | 5,40 | 0,50 | 0,12 | 0,06 |

Tablo 3.11. ½ Gaz konumu, benzin-hidrojen karışımı ölçüm tablosu
($m_h=22,43 \times 10^{-6}$ kg/s)

| n (d/dak) | M_d (Nm) | m_g (g/s) | T_1 (°C) | T_2 (°C) | T_3 (°C) | T_4 (°C) | T_5 (°C) | T_6 (°C) | T_7 (°C) | T_8 (°C) | T_9 (°C) | T_{10} (°C) | V_{hava} (m/s) | h (mm) | CO % Hac | HC % Hac |
|--------------|---------------|----------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|------------------|---------------------|-----------|-------------|-------------|
| 996 | 123 | 0,802 | 26 | 24 | 47 | 332 | 41,3 | 43,1 | 112 | 16 | 18 | 21 | 1,9 | 8 | 1,15 | 419 |
| 1200 | 122 | 0,895 | 26 | 24 | 45 | 345 | 41,4 | 43,2 | 123 | 16 | 18 | 22 | 2,25 | 10 | 1,23 | 415 |
| 1410 | 119 | 0,963 | 26 | 24 | 46 | 357 | 41,6 | 43,3 | 130 | 16 | 20 | 23 | 2,44 | 11 | 1,32 | 376 |
| 1605 | 116 | 1,041 | 26 | 24 | 46 | 371 | 41,7 | 43,5 | 136 | 16 | 22 | 25 | 2,65 | 13 | 1,38 | 365 |
| 1802 | 110 | 1,100 | 26 | 24 | 43 | 383 | 41,8 | 43,6 | 149 | 16 | 22 | 26 | 2,89 | 15 | 1,46 | 354 |
| 2000 | 108 | 1,203 | 26 | 24 | 50 | 391 | 42,1 | 43,8 | 156 | 16 | 24 | 26 | 2,9 | 20 | 1,61 | 331 |
| 2205 | 104 | 1,283 | 26 | 24 | 52 | 403 | 42,5 | 43,9 | 168 | 16 | 27 | 28 | 2,93 | 23 | 1,73 | 319 |
| 2398 | 99 | 1,426 | 26 | 24 | 53 | 415 | 42,8 | 44,4 | 176 | 16 | 31 | 30 | 2,94 | 26 | 1,82 | 315 |
| 2600 | 96 | 1,540 | 26 | 25 | 53 | 431 | 43,2 | 44,9 | 189 | 16 | 36 | 33 | 2,99 | 30 | 1,85 | 320 |
| 2810 | 93 | 1,750 | 26 | 25 | 53 | 452 | 43,5 | 45,2 | 196 | 16 | 39 | 35 | 3,02 | 35 | 1,8 | 309 |
| 3010 | 89 | 1,833 | 26 | 25 | 53 | 480 | 43,7 | 45,4 | 201 | 16 | 41 | 38 | 3,04 | 37 | 1,81 | 298 |

Tablo 3.12. ½ Gaz konumu, benzin-hidrojen karışımı motor karakteristikleri tablosu
($m_h=22,43 \times 10^{-6}$ kg/s)

| m_h/m_g (x 100) | P_c (kW) | η_e | P_{me} (MPa) | b_c (g/kWh) | α | η_v | Q_y (kW) | Q_s (kW) | Q_e (kW) | Q_k (kW) | Q_e/Q_y | Q_s/Q_y | Q_k/Q_y |
|----------------------|---------------|----------|-------------------|------------------|----------|----------|---------------|---------------|---------------|---------------|-----------|-----------|-----------|
| 2.796 | 12.83 | 0,34 | 0,861 | 231,370 | 0,982 | 0,635 | 37,98 | 4,66 | 11,34 | 9,16 | 0,30 | 0,12 | 0,24 |
| 2.505 | 15.33 | 0,36 | 0,854 | 215,512 | 1,110 | 0,624 | 42,09 | 5,21 | 12,70 | 8,85 | 0,30 | 0,12 | 0,21 |
| 2.330 | 17,57 | 0,39 | 0,833 | 201,796 | 1,120 | 0,576 | 45,04 | 5,16 | 14,67 | 7,64 | 0,33 | 0,11 | 0,17 |
| 2.156 | 19,50 | 0,40 | 0,812 | 196,274 | 1,125 | 0,550 | 48,48 | 5,94 | 18,97 | 4,07 | 0,39 | 0,12 | 0,08 |
| 2.039 | 20,76 | 0,41 | 0,770 | 194,664 | 1,161 | 0,534 | 51,09 | 6,38 | 19,58 | 4,37 | 0,38 | 0,12 | 0,09 |
| 1.864 | 22,62 | 0,41 | 0,756 | 195,053 | 1,065 | 0,483 | 55,63 | 6,96 | 19,26 | 6,79 | 0,35 | 0,13 | 0,12 |
| 1.748 | 24,01 | 0,41 | 0,728 | 195,748 | 1,009 | 0,442 | 59,16 | 6,14 | 22,35 | 6,65 | 0,38 | 0,10 | 0,11 |
| 1,573 | 24,86 | 0,38 | 0,693 | 209,732 | 0,911 | 0,408 | 65,43 | 7,46 | 26,17 | 6,94 | 0,40 | 0,11 | 0,11 |
| 1,456 | 26,14 | 0,37 | 0,672 | 215,194 | 0,858 | 0,383 | 70,45 | 8,52 | 31,35 | 4,44 | 0,44 | 0,12 | 0,06 |
| 1,282 | 27,37 | 0,34 | 0,651 | 233,160 | 0,762 | 0,358 | 79,69 | 9,20 | 35,92 | 7,21 | 0,45 | 0,12 | 0,09 |
| 1,223 | 28,05 | 0,34 | 0,623 | 238,144 | 0,733 | 0,336 | 83,36 | 9,46 | 43,49 | 2,35 | 0,52 | 0,11 | 0,03 |

Tablo 3.13. ½ Gaz konumu, benzin-hidrojen karışımı ölçüm tablosu
($m_h=36,02 \times 10^{-6}$ kg/s)

| n (d/dak) | M_d (Nm) | m_g (g/s) | T_1 (°C) | T_2 (°C) | T_3 (°C) | T_4 (°C) | T_5 (°C) | T_6 (°C) | T_7 (°C) | T_8 (°C) | T_9 (°C) | T_{10} (°C) | V_{hava} (m/s) | h (mm) | CO % Hac | HC % Hac |
|--------------|---------------|----------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|------------------|---------------------|-----------|-------------|-------------|
| 992 | 123 | 0,770 | 26 | 24 | 46 | 322 | 42,8 | 44 | 108 | 16 | 18 | 21 | 1,89 | 8 | 1,19 | 410 |
| 1201 | 121 | 0,856 | 26 | 24 | 45 | 334 | 42,9 | 44,2 | 117 | 16 | 18 | 22 | 2,23 | 10 | 1,25 | 403 |
| 1406 | 118 | 0,917 | 26 | 24 | 46 | 347 | 43 | 44,3 | 125 | 16 | 20 | 23 | 2,45 | 11 | 1,28 | 370 |
| 1601 | 115 | 0,963 | 26 | 24 | 46 | 359 | 43,1 | 44,3 | 130 | 16 | 22 | 25 | 2,66 | 13 | 1,4 | 361 |
| 1807 | 110 | 1,041 | 26 | 24 | 43 | 372 | 43,2 | 44,5 | 144 | 16 | 22 | 26 | 2,89 | 15 | 1,5 | 349 |
| 1994 | 107 | 1,167 | 26 | 24 | 52 | 380 | 43,3 | 44,6 | 151 | 16 | 24 | 26 | 2,91 | 20 | 1,65 | 330 |
| 2207 | 103 | 1,242 | 26 | 24 | 52 | 391 | 43,4 | 44,7 | 164 | 16 | 27 | 28 | 2,93 | 23 | 1,79 | 317 |
| 2410 | 96 | 1,351 | 26 | 24 | 53 | 404 | 43,5 | 44,7 | 171 | 16 | 31 | 30 | 2,95 | 26 | 1,83 | 312 |
| 2604 | 95 | 1,481 | 26 | 24 | 53 | 421 | 43,7 | 45 | 184 | 16 | 36 | 33 | 3 | 30 | 1,85 | 321 |
| 2792 | 94 | 1,674 | 26 | 25 | 53 | 436 | 43,8 | 45,1 | 190 | 16 | 39 | 35 | 3,02 | 35 | 1,89 | 303 |
| 3002 | 89 | 1,750 | 26 | 25 | 53 | 467 | 44 | 45,3 | 195 | 16 | 41 | 38 | 3,05 | 37 | 1,84 | 299 |

Tablo 3.14. ½ Gaz konumu, benzin-hidrojen karışımı motor karakteristikleri tablosu
($m_h=36,02 \times 10^{-6}$ kg/s)

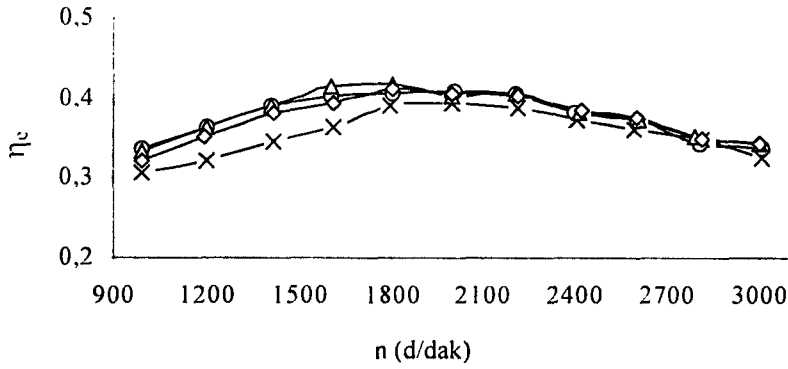
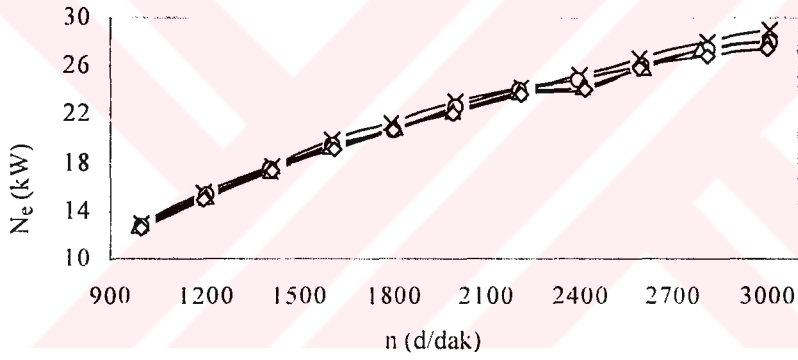
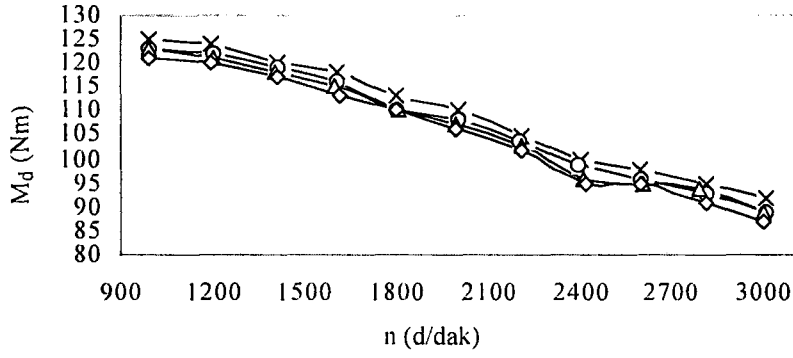
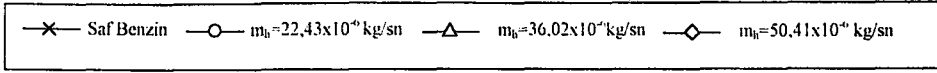
| m_h/m_g (x 100) | P_c (kW) | η_c | P_{me} (MPa) | b_c (g/kWh) | α | η_v | Q_y (kW) | Q_s (kW) | Q_c (kW) | Q_k (kW) | Q_e/Q_y | Q_s/Q_y | Q_k/Q_y |
|----------------------|---------------|----------|-------------------|------------------|----------|----------|---------------|---------------|---------------|---------------|-----------|-----------|-----------|
| 4,678 | 12,78 | 0,33 | 0,861 | 227,093 | 0,978 | 0,634 | 38,20 | 3,11 | 11,46 | 10,86 | 0,30 | 0,08 | 0,28 |
| 4,210 | 15,22 | 0,36 | 0,847 | 210,913 | 1,152 | 0,618 | 41,97 | 3,76 | 13,00 | 9,98 | 0,31 | 0,09 | 0,24 |
| 3,929 | 17,37 | 0,39 | 0,826 | 197,404 | 1,181 | 0,580 | 44,66 | 3,95 | 14,91 | 8,43 | 0,33 | 0,09 | 0,19 |
| 3,742 | 19,28 | 0,41 | 0,805 | 186,441 | 1,221 | 0,553 | 46,67 | 3,96 | 19,33 | 4,10 | 0,41 | 0,08 | 0,09 |
| 3,462 | 20,82 | 0,42 | 0,770 | 186,192 | 1,227 | 0,533 | 50,11 | 4,61 | 19,76 | 4,93 | 0,39 | 0,09 | 0,10 |
| 3,087 | 22,34 | 0,40 | 0,749 | 193,784 | 1,102 | 0,486 | 55,66 | 5,32 | 19,42 | 8,57 | 0,35 | 0,10 | 0,15 |
| 2,900 | 23,80 | 0,40 | 0,721 | 193,264 | 1,042 | 0,442 | 58,97 | 5,70 | 22,27 | 7,19 | 0,38 | 0,10 | 0,12 |
| 2,666 | 24,23 | 0,38 | 0,672 | 206,077 | 0,965 | 0,408 | 63,76 | 5,60 | 26,33 | 7,60 | 0,41 | 0,09 | 0,12 |
| 2,433 | 25,91 | 0,37 | 0,665 | 210,783 | 0,895 | 0,384 | 69,48 | 6,52 | 31,61 | 5,45 | 0,45 | 0,09 | 0,08 |
| 2,152 | 27,48 | 0,35 | 0,658 | 223,980 | 0,797 | 0,360 | 77,97 | 7,04 | 35,94 | 7,51 | 0,46 | 0,09 | 0,10 |
| 2,058 | 27,98 | 0,34 | 0,623 | 229,805 | 0,770 | 0,338 | 81,32 | 7,24 | 43,89 | 2,22 | 0,54 | 0,09 | 0,03 |

Tablo 3.15. ½ Gaz konumu, benzin-hidrojen karışımı ölçüm tablosu
($m_h=50,41 \times 10^{-6}$ kg/s)

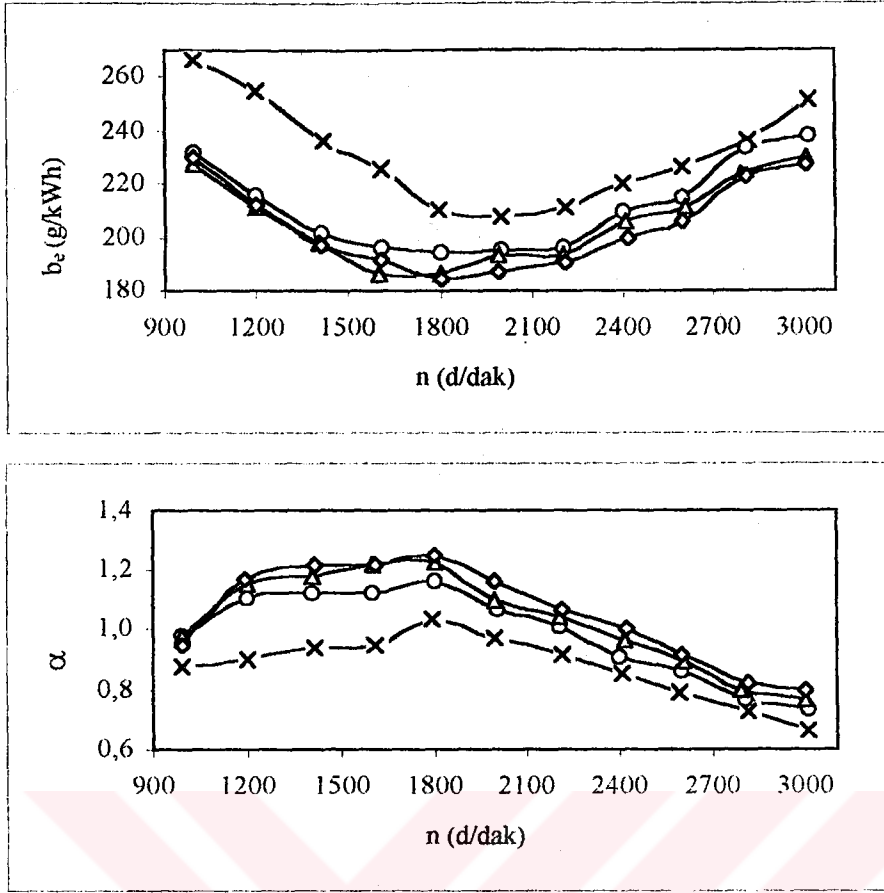
| n (d/dak) | M_d (Nm) | m_g (g/s) | T_1 (°C) | T_2 (°C) | T_3 (°C) | T_4 (°C) | T_5 (°C) | T_6 (°C) | T_7 (°C) | T_8 (°C) | T_9 (°C) | T_{10} (°C) | V_{hava} (m/s) | h (mm) | CO % Hac | HC % Hac |
|--------------|---------------|----------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|------------------|---------------------|-----------|-------------|-------------|
| 996 | 121 | 0,755 | 26 | 24 | 45 | 460 | 42,1 | 43 | 105 | 16 | 18 | 21 | 1,9 | 8 | 1,4 | 431 |
| 1197 | 120 | 0,837 | 26 | 24 | 45 | 329 | 42,2 | 43,1 | 113 | 16 | 18 | 22 | 2,24 | 10 | 1,46 | 418 |
| 1414 | 117 | 0,895 | 26 | 24 | 46 | 342 | 42,3 | 43,3 | 121 | 16 | 20 | 23 | 2,5 | 11 | 1,52 | 398 |
| 1610 | 113 | 0,963 | 26 | 24 | 46 | 354 | 42,4 | 43,5 | 137 | 16 | 22 | 25 | 2,68 | 13 | 1,56 | 394 |
| 1800 | 110 | 1,013 | 26 | 24 | 43 | 367 | 42,6 | 44,6 | 140 | 16 | 22 | 26 | 2,9 | 15 | 1,62 | 382 |
| 1993 | 106 | 1,100 | 26 | 24 | 52 | 376 | 42,7 | 43,7 | 147 | 16 | 24 | 26 | 2,93 | 20 | 1,75 | 351 |
| 2212 | 102 | 1,203 | 26 | 24 | 52 | 387 | 42,8 | 43,7 | 161 | 16 | 27 | 28 | 2,95 | 23 | 8,07 | 332 |
| 2418 | 95 | 1,283 | 26 | 24 | 53 | 401 | 43 | 43,9 | 167 | 16 | 31 | 30 | 2,96 | 26 | 7,79 | 325 |
| 2595 | 95 | 1,426 | 26 | 24 | 53 | 418 | 43,2 | 44,2 | 181 | 16 | 36 | 33 | 3 | 30 | 1,9 | 323 |
| 2811 | 91 | 1,604 | 26 | 25 | 53 | 433 | 43,3 | 44,2 | 187 | 16 | 39 | 37 | 3,01 | 35 | 2,04 | 319 |
| 3002 | 87 | 1,674 | 26 | 25 | 53 | 464 | 43,5 | 44,4 | 191 | 16 | 41 | 37 | 3,06 | 37 | 2,18 | 315 |

Tablo 3.16. ½ Gaz konumu, benzin-hidrojen karışımı motor karakteristikleri tablosu
($m_h=50,41 \times 10^{-6}$ kg/s)

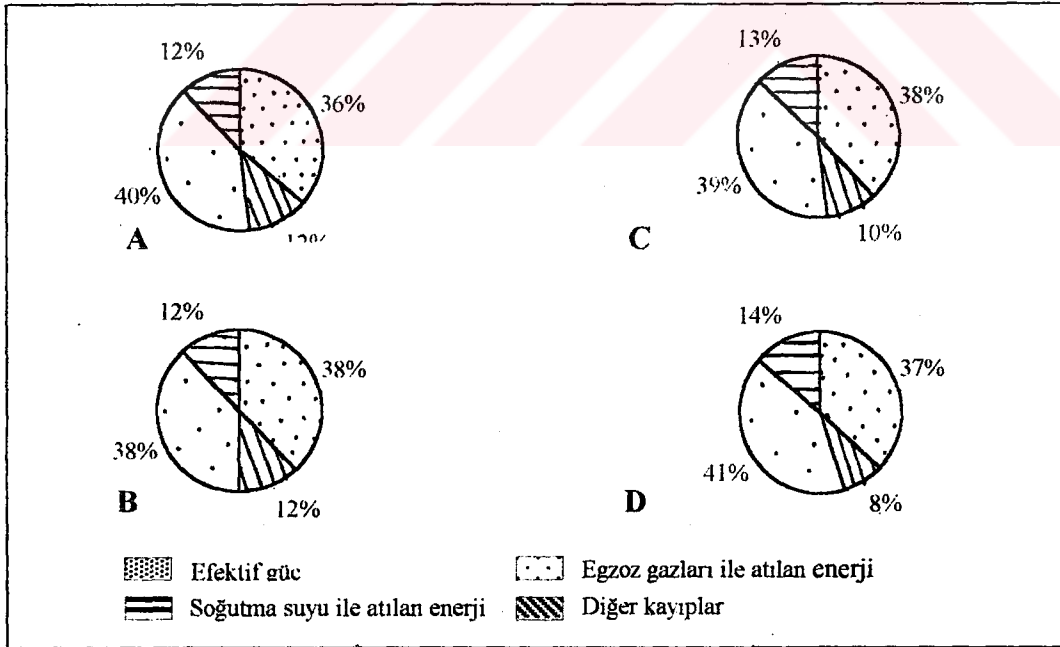
| m_h/m_g (x 100) | P_e (kW) | η_e | P_{me} (MPa) | b_c (g/kWh) | α | η_v | Q_y (kW) | Q_s (kW) | Q_e (kW) | Q_k (kW) | Q_e/Q_y | Q_s/Q_y | Q_k/Q_y |
|----------------------|---------------|----------|-------------------|------------------|----------|----------|---------------|---------------|---------------|---------------|-----------|-----------|-----------|
| 6.678 | 12.62 | 0,32 | 0,847 | 229,717 | 0,949 | 0,635 | 39,26 | 2,33 | 17,38 | 6,94 | 0,44 | 0,06 | 0,18 |
| 6.023 | 15.04 | 0,35 | 0,840 | 212,374 | 1,167 | 0,623 | 42,87 | 2,60 | 13,33 | 11,90 | 0,31 | 0,06 | 0,28 |
| 5.630 | 17.32 | 0,38 | 0,819 | 196,526 | 1,217 | 0,589 | 45,44 | 3,03 | 15,26 | 9,83 | 0,34 | 0,07 | 0,22 |
| 5.237 | 19.05 | 0,39 | 0,791 | 191,399 | 1,214 | 0,554 | 48,40 | 3,63 | 17,88 | 7,83 | 0,37 | 0,07 | 0,16 |
| 4.976 | 20.73 | 0,41 | 0,770 | 184,661 | 1,248 | 0,537 | 50,63 | 7,09 | 20,13 | 2,67 | 0,40 | 0,14 | 0,05 |
| 4.583 | 22.12 | 0,41 | 0,742 | 187,203 | 1,161 | 0,490 | 54,45 | 4,09 | 19,82 | 8,41 | 0,36 | 0,08 | 0,15 |
| 4.190 | 23.63 | 0,40 | 0,714 | 190,996 | 1,069 | 0,444 | 58,99 | 3,95 | 22,52 | 8,89 | 0,38 | 0,07 | 0,15 |
| 3,928 | 24,06 | 0,38 | 0,665 | 199,603 | 1,006 | 0,408 | 62,51 | 4,20 | 26,89 | 7,37 | 0,43 | 0,07 | 0,12 |
| 3,535 | 25,82 | 0,38 | 0,665 | 205,872 | 0,917 | 0,385 | 68,79 | 5,01 | 32,02 | 5,94 | 0,47 | 0,07 | 0,09 |
| 3,142 | 26,79 | 0,35 | 0,637 | 222,361 | 0,818 | 0,357 | 76,63 | 4,87 | 40,23 | 4,74 | 0,53 | 0,06 | 0,06 |
| 3,012 | 27,35 | 0,34 | 0,609 | 226,967 | 0,797 | 0,339 | 79,70 | 5,01 | 42,72 | 4,62 | 0,54 | 0,06 | 0,06 |



Şekil 3.4. ½ Gaz konumunda moment, efektif güç ve efektif verimin devir sayısı ile değişimi



Şekil 3.5. 1/2 Gaz konumunda özgül yakıt tüketimi ve hava fazlalık katsayısının devir sayısı ile değişimi



Şekil 3.6. 1/2 Gaz konumunda enerji dağılım oranları

A: Saf benzin

B: $m_h = 22,43 \times 10^{-6}$ kg/sn

C: $m_h = 36,02 \times 10^{-6}$ kg/sn

D: $m_h = 50,41 \times 10^{-6}$ kg/sn

- Gaz pedalı konumunda yapılan çalışmalarda efektif verimin ortalama değeri %36; $22,43 \times 10^{-6}$ kg/s hidrojen ilave edildiğinde % 38; $36,02 \times 10^{-6}$ kg/s hidrojen ilave edildiğinde % 38; $50,41 \times 10^{-6}$ kg/s hidrojen ilave edildiğinde ise % 37 olduğu gözlenmiştir.
- Benzinle yapılan çalışmalarda α (hava fazlalık katsayısı) ortalama değeri 0,88 olurken, bu değer $22,43 \times 10^{-6}$ kg/s hidrojen ilavesi ile 0,99; $36,02 \times 10^{-6}$ kg/s hidrojen ilavesi ile 1,03; $50,41 \times 10^{-6}$ kg/s hidrojen ilavesi ile 1,05'e kadar değişmiştir.
- Benzinle yapılan çalışmalarda özgül yakıt tüketimi ortalama değeri 231,35 g/kWh olurken; $22,43 \times 10^{-6}$ kg/s hidrojen ilave edildiğinde 211,51 g/kWh; $36,02 \times 10^{-6}$ kg/s hidrojen ilave edildiğinde 205,95 g/kWh; $50,41 \times 10^{-6}$ kg/s hidrojen ilave edildiğinde 204,33 g/kWh değerine düşmüştür.
- $22,43 \times 10^{-6}$ kg/s hidrojen ilave edildiğinde motora sevk edilen hidrojen debisinin benzin debisine oranı ortalama olarak % 1,91 olarak gözlenirken; $36,02 \times 10^{-6}$ kg/s hidrojen ilavesi ile % 3,2; $50,41 \times 10^{-6}$ kg/s hidrojen ilavesi ile % 4,63 olduğu görölmüştür.

Tablo 3.17. ¾ Gaz konumu, saf benzin ölçüm tablosu

| n (d/dak) | M _d (Nm) | m _g (g/s) | T ₁ (°C) | T ₂ (°C) | T ₃ (°C) | T ₄ (°C) | T ₅ (°C) | T ₆ (°C) | T ₇ (°C) | T ₈ (°C) | T ₉ (°C) | T ₁₀ (°C) | V _{hava} (m/s) | h (mm) | CO % Hac | HC % Hac |
|--------------|------------------------|-------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|-------------------------|----------------------------|-----------|-------------|-------------|
| 1007 | 182 | 1,375 | 24 | 23 | 49 | 461 | 40,1 | 42 | 142 | 16 | 18 | 24 | 2,78 | 6 | 0,92 | 780 |
| 1495 | 171 | 1,604 | 24 | 23 | 47 | 499 | 40,3 | 42,2 | 161 | 16 | 22 | 28 | 3,31 | 11 | 1,12 | 703 |
| 2017 | 155 | 1,925 | 24 | 23 | 48 | 544 | 40,7 | 42,6 | 187 | 16 | 26 | 30 | 3,57 | 18 | 1,19 | 650 |
| 2506 | 151 | 2,265 | 24 | 23 | 51 | 581 | 41 | 43,1 | 222 | 16 | 31 | 38 | 3,77 | 27 | 1,27 | 572 |
| 3002 | 131 | 2,333 | 25 | 23 | 56 | 599 | 41,6 | 43,7 | 256 | 16 | 41 | 40 | 3,94 | 38 | 1,32 | 562 |
| 3534 | 112 | 2,406 | 25 | 23 | 59 | 612 | 42 | 44,1 | 275 | 16 | 46 | 43 | 4,08 | 50 | 1,24 | 550 |
| 4000 | 105 | 2,567 | 25 | 24 | 62 | 627 | 42,4 | 44,4 | 294 | 16 | 62 | 45 | 4,21 | 65 | 1,28 | 531 |
| 4501 | 99 | 2,750 | 25 | 24 | 64 | 638 | 42,8 | 44,7 | 312 | 16 | 68 | 47 | 4,42 | 84 | 1,36 | 512 |

Tablo 3.18. ¾ Gaz konumu, saf benzin motor karakteristikleri tablosu

| P _e (kW) | η _e | P _{me} (MPa) | b _e (g/kWh) | α | η _v | Q _y (kW) | Q _s (kW) | Q _e (kW) | Q _k (kW) | Q _s /Q _y | Q _e /Q _y | Q _k /Q _y |
|------------------------|----------------|--------------------------|---------------------------|-------|----------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| 19,19 | 0,32 | 1,273 | 257,915 | 0,899 | 0,919 | 60,50 | 4,26 | 19,64 | 17,41 | 0,07 | 0,32 | 0,29 |
| 26,77 | 0,38 | 1,196 | 215,718 | 0,918 | 0,737 | 70,58 | 5,77 | 28,57 | 9,48 | 0,08 | 0,40 | 0,13 |
| 32,74 | 0,39 | 1,085 | 211,674 | 0,825 | 0,589 | 84,70 | 7,38 | 31,50 | 13,08 | 0,09 | 0,37 | 0,15 |
| 39,63 | 0,40 | 1,057 | 205,744 | 0,740 | 0,501 | 99,65 | 9,98 | 44,70 | 5,34 | 0,10 | 0,45 | 0,05 |
| 41,18 | 0,40 | 0,917 | 203,971 | 0,749 | 0,437 | 102,67 | 11,84 | 44,64 | 5,00 | 0,12 | 0,43 | 0,05 |
| 41,45 | 0,39 | 0,784 | 208,992 | 0,752 | 0,384 | 105,88 | 13,59 | 48,22 | 2,62 | 0,13 | 0,46 | 0,02 |
| 43,98 | 0,39 | 0,735 | 210,085 | 0,727 | 0,350 | 112,93 | 14,75 | 52,42 | 1,77 | 0,13 | 0,46 | 0,02 |
| 46,66 | 0,39 | 0,693 | 212,160 | 0,712 | 0,327 | 121,00 | 15,93 | 54,26 | 4,15 | 0,13 | 0,45 | 0,03 |

Tablo 3.19. ¼ Gaz konumu, benzin-hidrojen karışımı ölçüm tablosu $(m_h=36,02 \times 10^{-6} \text{ kg/s})$

| n (d/dak) | M_d (Nm) | m_g (g/s) | T_1 (°C) | T_2 (°C) | T_3 (°C) | T_4 (°C) | T_5 (°C) | T_6 (°C) | T_7 (°C) | T_8 (°C) | T_9 (°C) | T_{10} (°C) | V_{hava} (m/s) | h (mm) | CO % Hac | HC % Hac |
|--------------|---------------|----------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|------------------|----------------------------|-----------|-------------|-------------|
| 1002 | 174 | 1,203 | 25 | 24 | 45 | 424 | 40,3 | 42 | 128 | 16 | 18 | 22 | 2,83 | 6 | 0,73 | 732 |
| 1497 | 166 | 1,426 | 25 | 24 | 48 | 462 | 40,5 | 42,2 | 142 | 16 | 22 | 26 | 3,36 | 11 | 0,86 | 688 |
| 2010 | 153 | 1,674 | 25 | 24 | 48 | 504 | 40,8 | 42,5 | 165 | 16 | 26 | 28 | 3,62 | 18 | 0,98 | 622 |
| 2508 | 148 | 2,026 | 25 | 24 | 50 | 528 | 41 | 42,7 | 206 | 16 | 31 | 36 | 3,82 | 27 | 1,04 | 561 |
| 3009 | 130 | 2,139 | 25 | 24 | 52 | 548 | 41,2 | 42,8 | 232 | 16 | 39 | 38 | 3,99 | 38 | 1,19 | 541 |
| 3510 | 115 | 2,200 | 25 | 24 | 57 | 562 | 41,5 | 43,1 | 264 | 16 | 43 | 41 | 4,13 | 50 | 1,27 | 532 |
| 4002 | 105 | 2,406 | 25 | 25 | 60 | 586 | 41,8 | 43,4 | 275 | 16 | 59 | 43 | 4,26 | 65 | 1,24 | 507 |
| 4497 | 104 | 2,567 | 25 | 25 | 64 | 598 | 42,2 | 43,8 | 298 | 16 | 64 | 45 | 4,47 | 84 | 1,14 | 489 |

Tablo 3.20. ¼ Gaz konumu, benzin-hidrojen karışımı motor karakteristikleri tablosu $(m_h=36,02 \times 10^{-6} \text{ kg/s})$

| m_h/m_g (x 100) | P_e (kW) | η_e | P_{me} (MPa) | b_e (g/kWh) | α | η_v | Q_y (kW) | Q_s (kW) | Q_e (kW) | Q_k (kW) | Q_s/Q_y | Q_e/Q_y | Q_k/Q_y |
|----------------------|---------------|----------|-------------------|------------------|----------|----------|---------------|---------------|---------------|---------------|-----------|-----------|-----------|
| 2,994 | 18,26 | 0,34 | 1,217 | 244,331 | 0,975 | 0,941 | 52,94 | 3,81 | 15,16 | 15,71 | 0,07 | 0,29 | 0,30 |
| 2,526 | 26,02 | 0,41 | 1,161 | 202,244 | 0,986 | 0,747 | 62,74 | 5,16 | 25,37 | 6,19 | 0,08 | 0,40 | 0,10 |
| 2,152 | 32,20 | 0,44 | 1,071 | 191,146 | 0,913 | 0,600 | 73,65 | 6,60 | 28,81 | 6,04 | 0,09 | 0,39 | 0,08 |
| 1,778 | 38,87 | 0,44 | 1,036 | 191,005 | 0,802 | 0,507 | 89,16 | 8,08 | 40,05 | 2,16 | 0,09 | 0,45 | 0,02 |
| 1,684 | 40,96 | 0,44 | 0,910 | 191,139 | 0,796 | 0,442 | 94,11 | 9,02 | 41,53 | 2,59 | 0,10 | 0,44 | 0,03 |
| 1,637 | 42,27 | 0,44 | 0,805 | 190,434 | 0,802 | 0,392 | 96,80 | 10,35 | 42,32 | 1,86 | 0,11 | 0,44 | 0,02 |
| 1,497 | 44,00 | 0,42 | 0,735 | 199,803 | 0,758 | 0,354 | 105,88 | 11,80 | 48,85 | 1,21 | 0,11 | 0,46 | 0,01 |
| 1,403 | 48,98 | 0,43 | 0,728 | 191,311 | 0,748 | 0,331 | 112,93 | 13,42 | 49,47 | 1,07 | 0,12 | 0,44 | 0,01 |

Tablo 3.21. $\frac{3}{4}$ Gaz konumu, benzin-hidrojen karışımı ölçüm tablosu $(m_H=46,75 \times 10^{-6} \text{ kg/s})$

| n (d/dak) | M_d (Nm) | m_g (g/s) | T_1 (°C) | T_2 (°C) | T_3 (°C) | T_4 (°C) | T_5 (°C) | T_6 (°C) | T_7 (°C) | T_8 (°C) | T_9 (°C) | T_{10} (°C) | V_{hava} (m/s) | h (mm) | CO % Hac | HC % Hac |
|--------------|---------------|----------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|------------------|---------------------|-----------|-------------|-------------|
| 1001 | 171 | 1,132 | 25 | 24 | 46 | 396 | 40 | 41,2 | 126 | 16 | 18 | 22 | 2,87 | 6 | 1,66 | 760 |
| 1473 | 164 | 1,328 | 25 | 24 | 47 | 439 | 40,4 | 41,8 | 134 | 16 | 22 | 25 | 3,4 | 11 | 1,48 | 708 |
| 2010 | 149 | 1,540 | 25 | 24 | 48 | 489 | 40,7 | 42 | 158 | 16 | 28 | 27 | 3,66 | 18 | 1,05 | 638 |
| 2511 | 145 | 1,833 | 25 | 24 | 50 | 507 | 41 | 42,4 | 198 | 16 | 32 | 33 | 3,86 | 27 | 0,89 | 571 |
| 3017 | 130 | 1,974 | 25 | 24 | 53 | 521 | 41,3 | 42,9 | 221 | 16 | 39 | 36 | 4,03 | 38 | 0,77 | 557 |
| 3462 | 121 | 2,139 | 25 | 25 | 57 | 530 | 41,6 | 43,2 | 252 | 16 | 44 | 40 | 4,17 | 50 | 1,08 | 439 |
| 4008 | 103 | 2,265 | 25 | 25 | 61 | 550 | 42,1 | 43,4 | 265 | 16 | 58 | 42 | 4,3 | 65 | 1,3 | 521 |
| 4502 | 102 | 2,406 | 25 | 25 | 64 | 554 | 42,7 | 44 | 288 | 16 | 62 | 44 | 4,51 | 84 | 1,21 | 515 |

Tablo 3.22. $\frac{3}{4}$ Gaz konumu, benzin-hidrojen karışımı motor karakteristikleri tablosu $(m_H=46,75 \times 10^{-6} \text{ kg/s})$

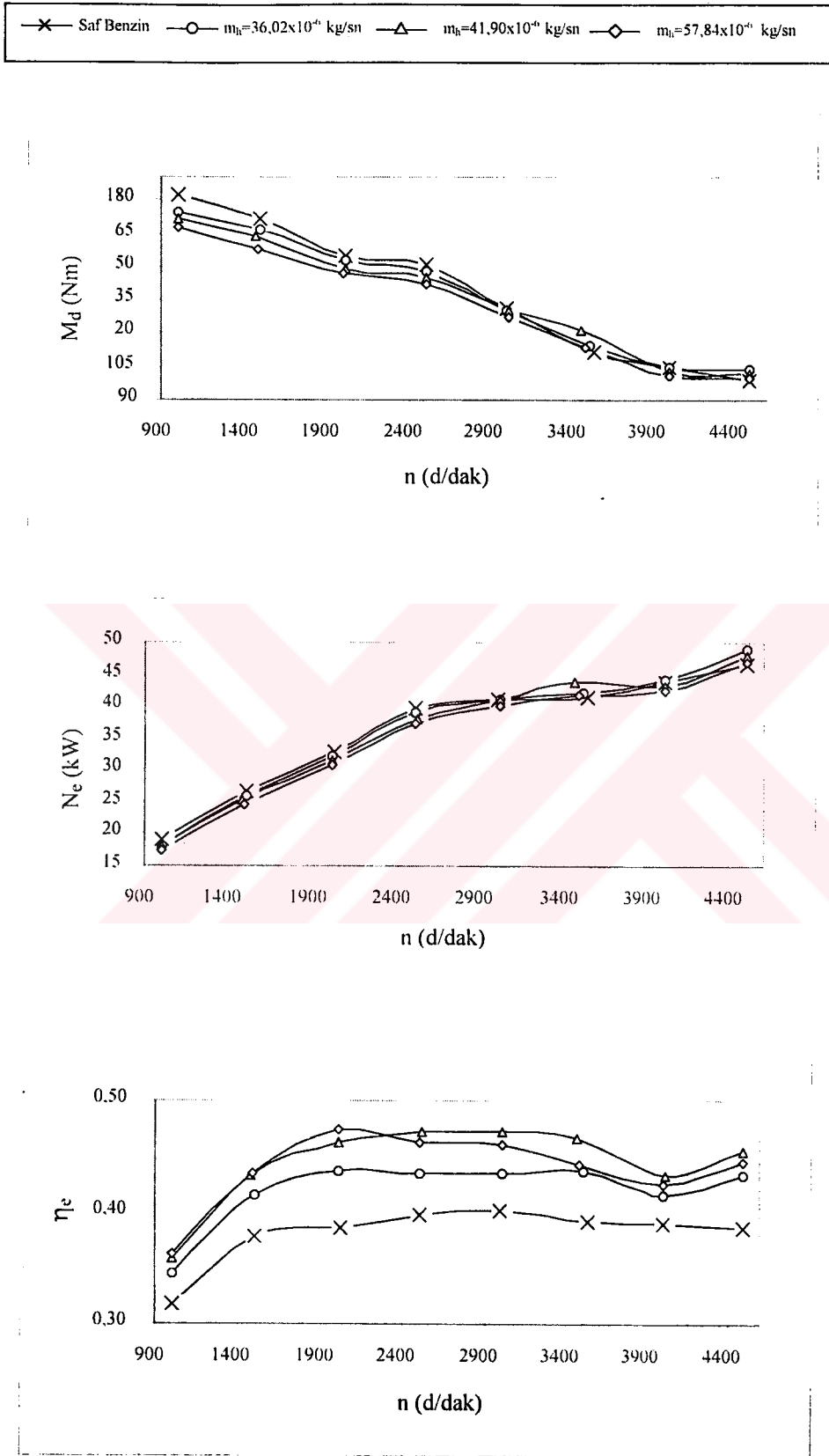
| m_H/m_g (x 100) | P_e (kW) | η_e | P_{me} (MPa) | b_e (g/kWh) | α | η_v | Q_y (kW) | Q_s (kW) | Q_e (kW) | Q_k (kW) | Q_s/Q_y | Q_e/Q_y | Q_k/Q_y |
|----------------------|---------------|----------|-------------------|------------------|----------|----------|---------------|---------------|---------------|---------------|-----------|-----------|-----------|
| 4.129 | 17,92 | 0,36 | 1,196 | 236,808 | 1,025 | 0,955 | 49,82 | 2,69 | 14,36 | 14,85 | 0,05 | 0,29 | 0,30 |
| 3.521 | 25,30 | 0,43 | 1,147 | 195,578 | 1,049 | 0,769 | 58,41 | 4,25 | 23,18 | 5,69 | 0,07 | 0,40 | 0,10 |
| 3.036 | 31,36 | 0,46 | 1,043 | 182,138 | 0,984 | 0,606 | 67,76 | 5,05 | 27,35 | 4,00 | 0,07 | 0,40 | 0,06 |
| 2.550 | 38,13 | 0,47 | 1,015 | 177,516 | 0,881 | 0,512 | 80,67 | 6,66 | 34,39 | 1,49 | 0,08 | 0,43 | 0,02 |
| 2,368 | 41,07 | 0,47 | 0,910 | 177,152 | 0,857 | 0,445 | 86,87 | 7,33 | 37,97 | 0,49 | 0,08 | 0,44 | 0,01 |
| 2.186 | 43,87 | 0,47 | 0,847 | 179,366 | 0,822 | 0,401 | 94,11 | 8,41 | 40,59 | 1,24 | 0,09 | 0,43 | 0,01 |
| 2,064 | 43,23 | 0,43 | 0,721 | 192,484 | 0,803 | 0,357 | 99,65 | 9,59 | 45,94 | 0,89 | 0,10 | 0,46 | 0,01 |
| 1,943 | 48,09 | 0,45 | 0,714 | 183,639 | 0,795 | 0,334 | 105,88 | 10,90 | 45,66 | 1,23 | 0,10 | 0,43 | 0,01 |

Tablo 3.23. ¼ Gaz konumu, benzin-hidrojen karışımı ölçüm tablosu $(m_h=57,84 \times 10^{-6} \text{kg/s})$

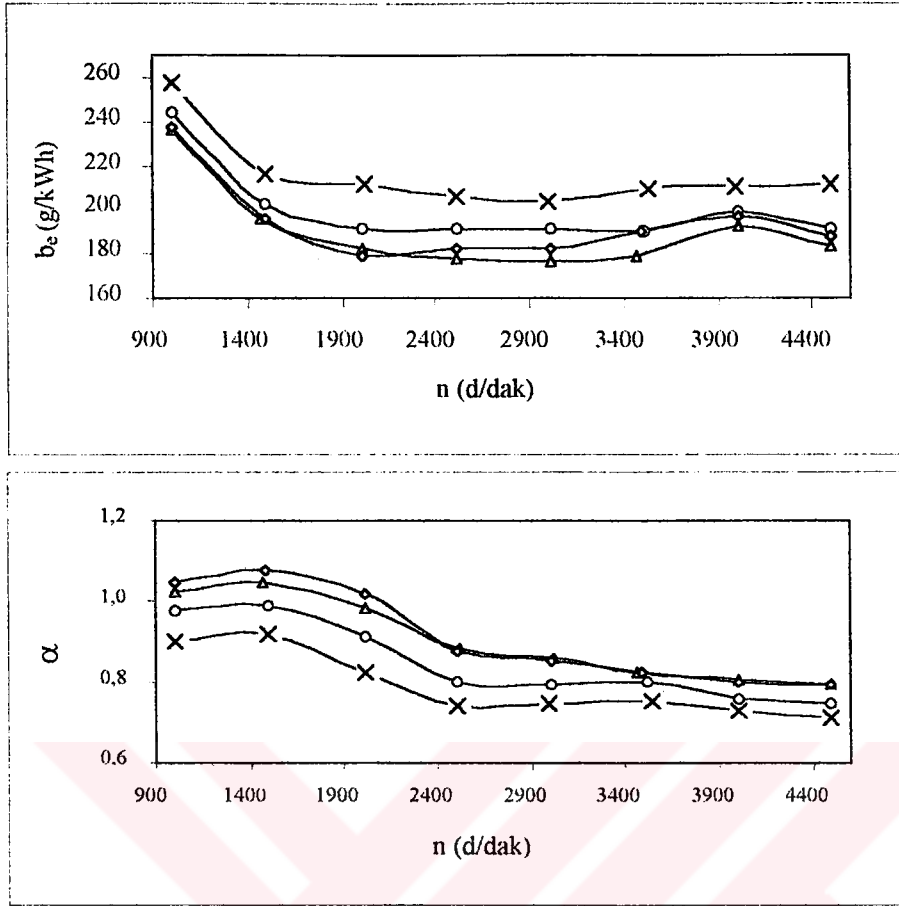
| n (d/dak) | M_d (Nm) | m_g (g/s) | T_1 (°C) | T_2 (°C) | T_3 (°C) | T_4 (°C) | T_5 (°C) | T_6 (°C) | T_7 (°C) | T_8 (°C) | T_9 (°C) | T_{10} (°C) | V_{hava} (m/s) | h (mm) | CO % Hac | HC % Hac |
|--------------|---------------|----------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|------------------|---------------------|-----------|-------------|-------------|
| 1003 | 167 | 1,100 | 25 | 24 | 45 | 394 | 40,1 | 41,2 | 124 | 16 | 18 | 23 | 2,91 | 6 | 1,17 | 786 |
| 1487 | 158 | 1,283 | 25 | 24 | 46 | 435 | 40,5 | 41,7 | 130 | 16 | 22 | 25 | 3,44 | 11 | 1,18 | 738 |
| 2008 | 147 | 1,481 | 25 | 24 | 47 | 482 | 40,8 | 42 | 154 | 16 | 29 | 27 | 3,7 | 18 | 1,28 | 689 |
| 2507 | 142 | 1,833 | 25 | 24 | 48 | 503 | 41 | 41,9 | 195 | 16 | 33 | 33 | 3,9 | 27 | 1,36 | 589 |
| 3010 | 127 | 1,974 | 25 | 24 | 50 | 518 | 41,3 | 42,4 | 217 | 16 | 39 | 36 | 4,07 | 38 | 1,32 | 561 |
| 3486 | 114 | 2,139 | 25 | 24 | 55 | 526 | 41,5 | 42,5 | 248 | 16 | 45 | 40 | 4,21 | 50 | 1,3 | 578 |
| 4006 | 101 | 2,265 | 25 | 25 | 59 | 547 | 41,9 | 43 | 261 | 16 | 60 | 42 | 4,34 | 65 | 1,37 | 543 |
| 4495 | 100 | 2,406 | 25 | 25 | 63 | 549 | 42,3 | 43,4 | 284 | 16 | 63 | 44 | 4,55 | 84 | 1,38 | 538 |

Tablo 3.24. ¼ Gaz konumu, benzin-hidrojen karışımı motor karakteristikleri tablosu $(m_h=57,84 \times 10^{-6} \text{kg/s})$

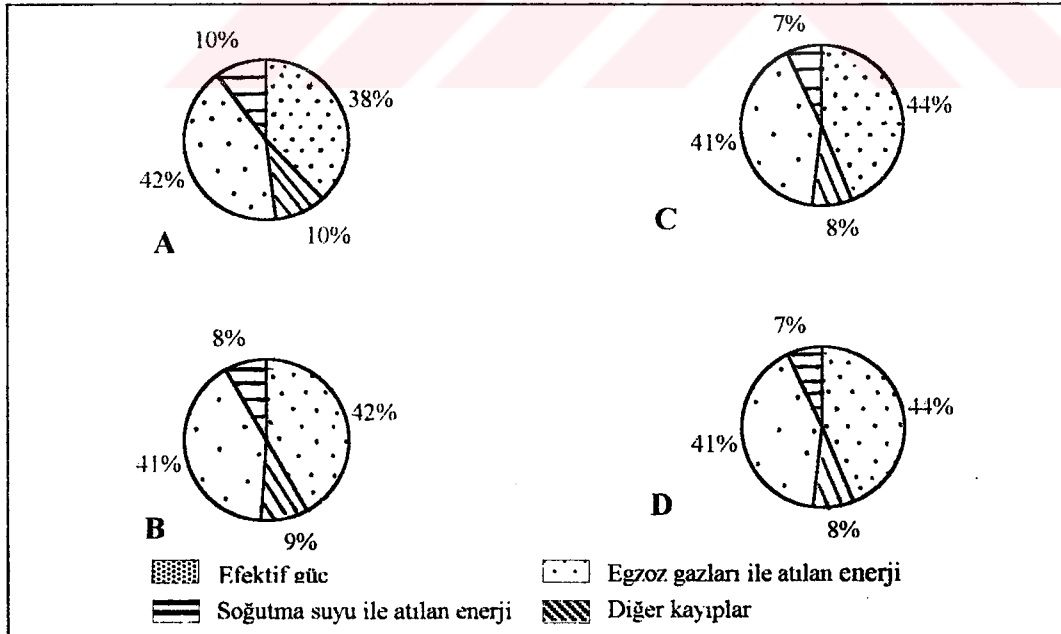
| m_h/m_g (x 100) | P_c (kW) | η_c | P_{me} (MPa) | b_c (g/kWh) | α | η_v | Q_y (kW) | Q_s (kW) | Q_e (kW) | Q_k (kW) | Q_s/Q_y | Q_e/Q_y | Q_k/Q_y |
|----------------------|---------------|----------|-------------------|------------------|----------|----------|---------------|---------------|---------------|---------------|-----------|-----------|-----------|
| 5.258 | 17,54 | 0,36 | 1,168 | 237,632 | 1,045 | 0,966 | 48,40 | 2,47 | 16,98 | 11,42 | 0,05 | 0,35 | 0,24 |
| 4.507 | 24,60 | 0,44 | 1,106 | 196,242 | 1,075 | 0,770 | 56,47 | 3,64 | 23,80 | 4,42 | 0,06 | 0,42 | 0,08 |
| 3.906 | 30,91 | 0,47 | 1,029 | 179,193 | 1,015 | 0,614 | 65,15 | 4,66 | 28,02 | 1,57 | 0,07 | 0,43 | 0,02 |
| 3.155 | 37,28 | 0,46 | 0,994 | 182,626 | 0,878 | 0,518 | 80,67 | 4,28 | 34,95 | 4,16 | 0,05 | 0,43 | 0,05 |
| 2.930 | 40,03 | 0,46 | 0,889 | 182,755 | 0,855 | 0,450 | 86,87 | 6,20 | 38,59 | 2,05 | 0,07 | 0,44 | 0,02 |
| 2.704 | 41,62 | 0,44 | 0,798 | 190,028 | 0,821 | 0,402 | 94,11 | 6,47 | 41,26 | 4,76 | 0,07 | 0,44 | 0,05 |
| 2.554 | 42,37 | 0,43 | 0,707 | 197,336 | 0,802 | 0,361 | 99,65 | 8,11 | 47,04 | 2,12 | 0,08 | 0,47 | 0,02 |
| 2,404 | 47,07 | 0,44 | 0,700 | 188,452 | 0,794 | 0,337 | 105,88 | 9,22 | 46,25 | 3,33 | 0,09 | 0,44 | 0,03 |



Şekil 3.7. $\frac{3}{4}$ Gaz konumunda moment, efektif güç ve efektif verimin devir sayısı ile değişimi



Şekil 3.8. $\frac{3}{4}$ Gaz konumunda özgül yakıt tüketimi ve hava fazlalık katsayısının devir sayısı ile değişimi



Şekil 3.9. $\frac{3}{4}$ Gaz konumunda enerji dağılım oranları

A: Saf benzin

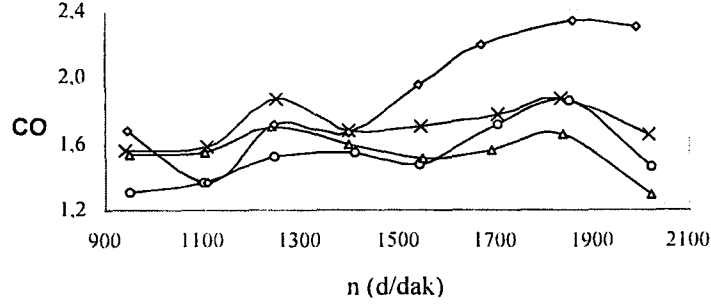
B: $m_h = 36,02 \times 10^{-6}$ kg/sn

C: $m_h = 41,90 \times 10^{-6}$ kg/sn

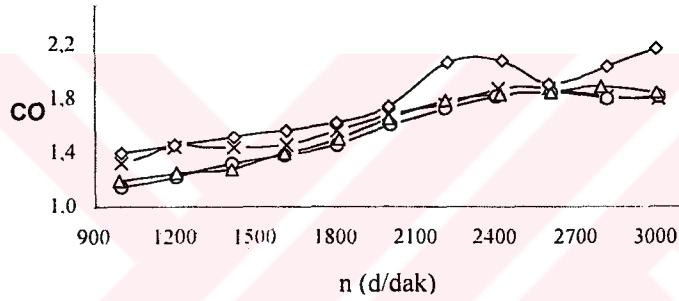
D: $m_h = 57,84 \times 10^{-6}$ kg/sn

- $\frac{3}{4}$ Gaz pedalı konumunda yapılan çalışmalarda efektif verimin ortalama değeri % 38,1; $36,02 \times 10^{-6}$ kg/s hidrojen ilave edildiğinde % 41,9; $46,75 \times 10^{-6}$ kg/s hidrojen ilave edildiğinde % 44; $57,84 \times 10^{-6}$ kg/s hidrojen ilave edildiğinde ise % 43,8 olduğu gözlenmiştir.
- Benzinle yapılan çalışmalarda α (hava fazlalık katsayısı) ortalama değeri 0,79 olurken, bu değer $36,02 \times 10^{-6}$ kg/s hidrojen ilavesi ile 0,85; $46,75 \times 10^{-6}$ kg/s hidrojen ilavesi ile 0,90; $57,84 \times 10^{-6}$ kg/s hidrojen ilavesi ile 0,91'e kadar değişmiştir.
- Benzinle yapılan çalışmalarda özgül yakıt tüketimi ortalama değeri 215,78 g/kWh olurken; $36,02 \times 10^{-6}$ kg/s hidrojen ilave edildiğinde 200,11 g/kWh; $46,75 \times 10^{-6}$ kg/s hidrojen ilave edildiğinde 190,58 g/kWh; $57,84 \times 10^{-6}$ kg/s hidrojen ilave edildiğinde 194,283 g/kWh değerine düşmüştür.
- $36,02 \times 10^{-6}$ kg/s hidrojen ilave edildiğinde motora sevk edilen hidrojen debisinin benzin debisine oranı ortalama olarak % 1,96 olarak gözlenirken; $46,75 \times 10^{-6}$ kg/s hidrojen ilavesi ile % 2,72; $57,84 \times 10^{-6}$ kg/s hidrojen ilavesi ile % 3,43 olduğu görülmüştür.

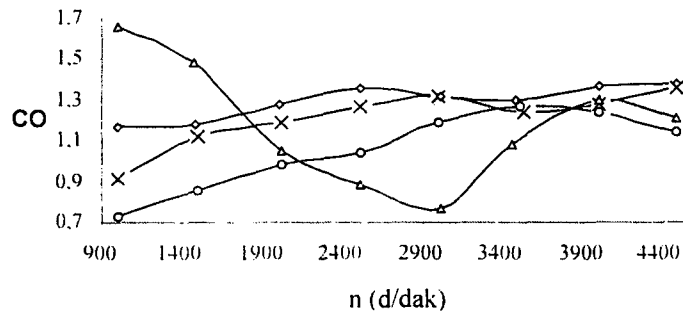
—x— Saf Benzin —o— $m_{H_2}=12,96 \times 10^{-6}$ kg/sn Hidrojen —△— $m_{H_2}=19,19 \times 10^{-6}$ kg/sn Hidrojen —◇— $m_{H_2}=25,74 \times 10^{-6}$ kg/sn Hidrojen



—x— Saf Benzin —o— $m_{H_2}=22,43 \times 10^{-6}$ kg/sn Hidrojen —△— $m_{H_2}=36,02 \times 10^{-6}$ kg/sn Hidrojen —◇— $m_{H_2}=50,41 \times 10^{-6}$ kg/sn Hidrojen

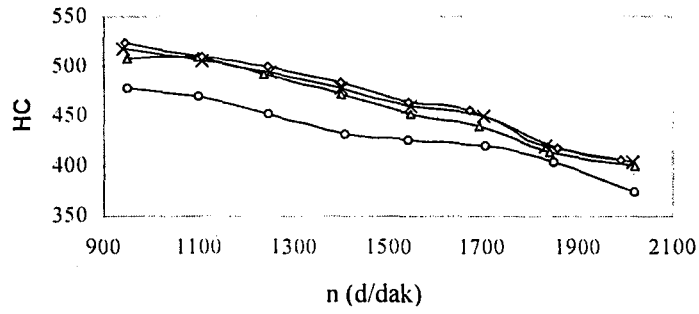


—x— Saf Benzin —o— $m_{H_2}=36,02 \times 10^{-6}$ kg/sn Hidrojen —△— $m_{H_2}=46,75 \times 10^{-6}$ kg/sn Hidrojen —◇— $m_{H_2}=57,84 \times 10^{-6}$ kg/sn Hidrojen

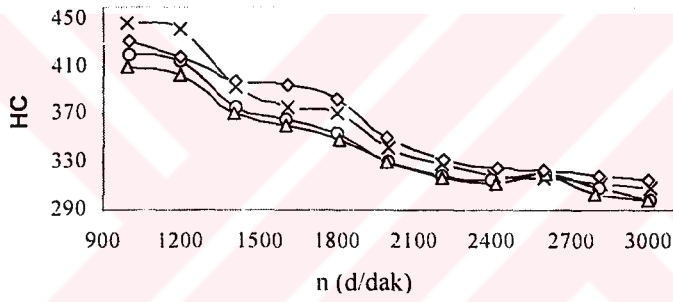


Şekil 3.11. CO Emisyonunun hidrojen miktarına bağlı olarak farklı yüklemelerde devir sayısına göre değişimi

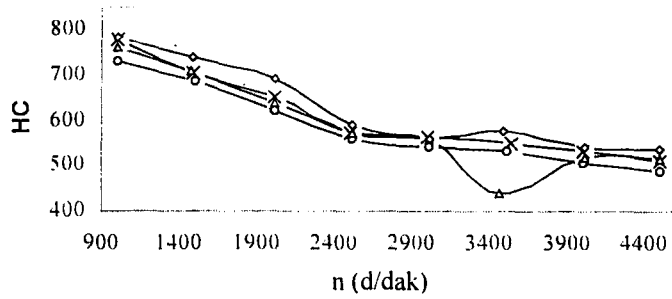
—x— Saf Benzin —o— $m_{H_2}=12,96 \times 10^{-4}$ kg/sn Hidrojen —△— $m_{H_2}=19,19 \times 10^{-4}$ kg/sn Hidrojen —◇— $m_{H_2}=25,74 \times 10^{-4}$ kg/sn Hidrojen



—x— Saf Benzin —o— $m_{H_2}=22,43 \times 10^{-4}$ kg/sn Hidrojen —△— $m_{H_2}=36,02 \times 10^{-4}$ kg/sn Hidrojen —◇— $m_{H_2}=50,41 \times 10^{-4}$ kg/sn Hidrojen



—x— Saf Benzin —o— $m_{H_2}=36,02 \times 10^{-4}$ kg/sn Hidrojen —△— $m_{H_2}=46,75 \times 10^{-4}$ kg/sn Hidrojen —◇— $m_{H_2}=57,84 \times 10^{-4}$ kg/sn Hidrojen



Şekil 3.11. HC Emisyonunun hidrojen miktarına bağlı olarak farklı yüklemelerde devir sayısına göre değişimi

- ¼ Gaz pedalı konumunda benzinle yapılan çalışmalarda egzoz gazları içerisinde CO emisyonu (% Hacim) ortalama değeri 1,71 olarak gözlenirken, bu değerin $12,96 \times 10^{-6}$ kg/s hidrojen verildiğinde 1,53; $19,19 \times 10^{-6}$ kg/s hidrojen verildiğinde 1,55; $25,74 \times 10^{-6}$ kg/s hidrojen verildiğinde 1,90 olarak değiştiği gözlemlenmiştir.
- ½ Gaz pedalı konumunda benzinle çalışıldığında CO emisyonu ortalama değeri 1,64; $22,43 \times 10^{-6}$ kg/s hidrojen verildiğinde 1,56; $36,02 \times 10^{-6}$ kg/s hidrojen verildiğinde 1,58; $50,41 \times 10^{-6}$ kg/s hidrojen verildiğinde ise 2,84 olmuştur.
- ¾ Gaz pedalı konumunda benzinle çalışıldığında CO emisyonu ortalama değeri 1,21 olarak gözlemlendi. Buna karşılık $36,02 \times 10^{-6}$ kg/s hidrojen verildiğinde bu değer 1,05; $46,75 \times 10^{-6}$ kg/s hidrojen verildiğinde 1,18 ve $57,84 \times 10^{-6}$ kg/s hidrojen verildiğinde 1,29 olarak değişim göstermiştir.
- ¼ Gaz pedalı konumunda benzinle yapılan çalışmalarda egzoz gazları içerisinde HC emisyonu (% Hacim) ortalama değeri 466,6 olarak gözlenirken, bu değerin $12,96 \times 10^{-6}$ kg/s hidrojen verildiğinde 432,5; $19,19 \times 10^{-6}$ kg/s hidrojen verildiğinde 461,4; $25,74 \times 10^{-6}$ kg/s hidrojen verildiğinde 470,8 olarak değiştiği gözlemlenmiştir.
- ½ Gaz pedalı konumunda benzinle çalışıldığında HC emisyonu ortalama değeri 359,5; $22,43 \times 10^{-6}$ kg/s hidrojen verildiğinde 347,4; $36,02 \times 10^{-6}$ kg/s hidrojen verildiğinde 343,2; $50,41 \times 10^{-6}$ kg/s hidrojen verildiğinde ise 362,5 olmuştur.
- ¾ Gaz pedalı konumunda benzinle çalışıldığında HC emisyonu ortalama değeri 607,5 olarak gözlemlendi. Buna karşılık $36,02 \times 10^{-6}$ kg/s hidrojen verildiğinde bu değer 584; $46,75 \times 10^{-6}$ kg/s hidrojen verildiğinde 588,6 ve $57,84 \times 10^{-6}$ kg/s hidrojen verildiğinde 627,8 olarak değişim göstermiştir.

4. TARTIŞMA ve ÖNERİLER

Geleceğin yakıtı olarak görülen hidrojenin, içten yanmalı motorlarda yakıt olarak kullanımı durumunda ortaya çıkan çeşitli olumsuzluklardan dolayı hidrojenin konvansiyonel olarak kullanılan fosil kökenli yakıtlarla birlikte kullanılması konusu üzerinde yoğunlaşan çalışmamız sonucunda elde ettiğimiz veriler, nedenleri ile birlikte daha önce bu konuda yapılan çalışmalarla karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.

Test düzeneğinde kullanılan motor, harici karışım yöntemi ile benzin hava karışımını emme manifoldunda oluşturarak silindir içerisine almaktadır. Hidrojen-benzin ikili yakıt prensibi ile çalıştırılmak üzere dönüştürülen motora hidrojen emme manifoldundan sabit miktarda verilmektedir. Hidrojen ilavesi esnasında benzin miktarı, sistemde kullanılan hava miktarı kontrolörüne etkide bulunularak kontrol edilmiştir. Ancak çok düşük yoğunluğa sahip olan hidrojenin ($83,764 \times 10^{-6} \text{ g/cm}^3$) emme manifoldundaki hava ile yer değiştirmesi sonucu ortaya çıkan yanma için gerekli hava miktarının azalması, motor çıkış gücünde düşüşe neden olmuştur. Bu etkiyi azaltmak için emme manifolduna farklı bir yoldan kontrollü bir şekilde hava verilmiştir (Şekil 2.1). Bu sayede volumetrik verim yaklaşık olarak benzine yapılan çalışmalardaki değeri ile aynı tutulmasına rağmen hidrojenin diğer bir özelliği olan düşük hacimsel enerji yoğunluğu sayesinde silindir içerisine alınan karışımın enerji miktarında meydana gelen düşüş, motor çıkış gücünde ve bu parametre ile bağıntılı olan moment ve ortalama efektif basınç parametrelerinde az miktarda bir kayba yol açmıştır.

Hidrojenin havada hacimsel stokiyometrik oranının % 29.53 kadar yüksek değerde olması ve kullanılan ilave giriş yolu ile artırılan hava miktarı sayesinde hava fazlalık katsayısı, benzine yapılan çalışmaların üzerine çıkarılmıştır (Şekil 3.2,3.5,3,8). Yüksek alev hızı, yüksek yanma hızı ve yüksek ısı değeri gibi mükemmel yakıtsal özellikleri sayesinde hidrojen silindir içerisinden ana hidrokarbon yakıtın yanmasını iyileştirerek efektif verimde % 20'lere varan oranlarda artış sağlamıştır. Bunun yanında özgül yakıt tüketimi özellikle düşük yüklemelerde % 26'lara kadar düşürülmüş ve ana hidrokarbon yakıt olan benzinin tüketim miktarı % 34'lere varan oranlarda azaltılmıştır. Lucas ve Richards, yaptıkları çalışmalarda efektif verimde artış sağlamış ve özgül yakıt

tüketiminde de % 30'lara varan düşüş kaydetmişlerdir [4]. Bu durum ayrıca Povel ve arkadaşlarının [11] ve May ve Gwinner'in [10] çalışmalarından elde ettikleri sonuçlarla benzerlik göstermektedir.

Eksik yanma ürünü olan CO emisyonunun egzoz gazları içerisindeki hacimsel yüzdesi, hidrojen ilavesi ile iyileşen yanma olayı sayesinde yaklaşık % 2 kütleli hidrojen/benzin oranında benzinle yapılan çalışmalara göre % 15'e kadar azaltılmasına rağmen, hidrojen/benzin oranı % 5'e çıkarıldığında az miktarda artış gözlenmiştir. Sebep olarak, % 5 hidrojen oranından sonra yanma için gerekli hava miktarının yeterince karşılanamaması sonucu eksik yanma oluştuğu düşünülmektedir. HC emisyonunun egzoz gazları içerisindeki değişimi de CO emisyonu ile paralellik göstermiş ve % 2 hidrojen oranında yaklaşık %5 düşmüş ancak hidrojen ilavesi % 5'e çıkarıldığında az miktarda artış görülmüştür. Lucas ve Richards, yaptıkları çalışmalarda hidrojen ilavesi ile CO emisyonunda azalma buna karşın HC emisyonunda ise büyük oranda artış kaydetmiş, sebep olarak ta daha yüksek oranlarda hidrojen ilavesi ile çalışılmasını göstermişlerdir [4]. Bunun yanı sıra Petkov ve Barzev, CO ve HC emisyonlarının hidrojen ilavesi ile azaldığını rapor etmişlerdir [7].

Hidrojen ilavesi ve tüketilen benzin miktarındaki azalma ile düşen toplam yakıt enerjisi ve hidrojenin yakıtsal özellikleri sayesinde artan efektif güç; soğutma suyu ile atılan enerji, egzoz gazları ile atılan enerji ve diğer yollarla kaybedilen enerji miktarlarında azalmayı beraberinde getirmiştir. Ancak yüksek yüklerde hidrojen ilavesi % 5'i geçtiği durumlarda egzoz gazları sıcaklığındaki artışla birlikte egzoz gazları ile atılan enerji miktarında artış meydana gelmiştir.

Çalışmalarımız konvansiyonel benzin motorunda ana yakıtta hidrojen ilavesinin düşük yüklemelerde çok daha etkin sonuçlar ortaya çıkardığını göstermiştir. Bu durum ise May ve Gwinner'in çalışmalarındaki gözlemleri ile paralellik arz etmektedir.

Sonuç olarak, laboratuvar şartlarında konvansiyonel benzin motorunda hidrojen-benzin karışımlarının kullanımı konusunda yaptığımız çalışmalarımızın, özellikle efektif verim

ve özgül yakıt tüketimi parametrelerinde elde ettiğimiz iyileştirmelerden dolayı araç üstünde yol testi ile farklı bir boyutta incelenmesini önermekteyiz. Özellikle araç üstünde hidrojen üretim sistemleri konularında yapılacak gelişmelerle birlikte, kullandığımız sistemin ana hidrokarbon yakıt tüketiminde önemli oranda azalmalar sağlayacağını düşünmekteyiz.

Yeni ve yenilenebilir enerji kaynaklarına olan ilginin gittikçe arttığı günümüz dünyasında, hidrojenin içten yanmalı motorlarda alternatif yakıt gerek ikili ve gerekse tek başına kullanımı konusuna ülkemizde de yeterince önem verilmesi temennisini taşımaktayız.



KAYNAKLAR

1. Heywood, J. B., 1988, Internal Combustion Engine Fundamentals. McGraw-Hill Book Company, Inc.
2. Safgönül, B., Ergeneman, M., Arslan, H. E. ve Soruşbay, C., 1995, İçten Yanmalı Motrorlar. İ.T.Ü Makina Fakültesi Otomotiv Anabilim Dalı.
3. Veziroğlu, T., N., Hydrogen Energy System: A Permanent Solution to Global Problems. Clean Energy Research Institute. Coral Gables.
4. Jamal, Y. ve Wyszynski, M. L., 1994, On-Board generation of hydrogen-rich fuels. Int. J. Hydrogen Energy, 19, (7), 557-572.
5. Maleev, V. L., 1945, Internal Combustion Engines. McGraw Hill Book Company, Inc.
6. North, D., C., 1992, An investigation of hydrogen as an internal combustion fuel. Int. J. Hydrogen Energy, 17, (7), 509-512.
7. Das, L., M., 1990, Hydrogen engines: A view of the past and a look into the future. Int. J. Hydrogen Energy, 15, (6), 425-443.
8. Norbeck, J., M., Heffel, J., W., Durbin, T., D., Tabbara, B., Bowden, J., M. ve Montano, M. C., 1996, Hydrogen Fuel for Surface Transportation. Society of Automotive Engineers, Inc. Macdonald & Co. Ltd., London.
9. Soruşbay, C. ve Arslan, E., 1988. Hidrojen-yakıtlı içten yanmalı motorlarda yanma performansı. Mühendis ve Makina Dergisi, 29, (339), 23-28.
10. May, H. ve Gwinner, D., 1983, Possibilities of improving emissions and energy consumption in mixed hydrogen-gasoline operation. Int. J. Hydrogen Energy, 8, (2), 121-129.
11. Povel, R., Jopler, J., Withelm, G. ve Halene, C., 1992, Hydrogen drive in field testing. Hydrogen Energy Progress V, Elmsford, p. 369.
12. Stebar, R., F. ve Parks, F., B., 1974, Emission control with lean operation using hydrogen-supplemented fuel. Society of Automotive Engineers, Inc., SAE Paper No: 740187.
13. Parks, F., B., 1976, A single-cylinder engine study of hydrogen-rich fuels. Society of Automotive Engineers, Inc., SAE Paper No: 760099.
14. Sadiq, M., A. ve Shahad, H., A., 2000, Improvement of performance and reduction of pollutant emission of a four stroke spark ignition engine

- fuelled with hydrogen-gasoline fuel mixture. *Energy Conversion and Management*, 41, 77-91.
15. Sheipak, A., A. ve Kabalkin, V., N., 1990 Adaptation of truck to gasoline-hydrogen fuel. *Hydrogen Energy Progress VII*, Hawaii, p. 1355-1363.
 16. Gopal, G., Rao, P., S., Gopalakrishnan, K., V. ve Murthy, B., S., 1982, Use of hydrogen in dual-fuel engines. *Int. J. Hydrogen Energy*, 7, (3), 267.
 17. Mathur, H., B., Das, L., M. ve Patro, T., N., 1992, Hydrogen fuel utilization in CI engine powered end utility systems. *Int. J. Hydrogen Energy*, 17, (5), 369-374.
 18. Raman, V., Hasel, J., Fulton, J. ve Bruderly, D., 1994. Hythane-An ultralean transportation fuel. *Hydrogen Energy Progress X*, p. 369.
 19. Hoekstra, R., L., Collier, K. veMulligan, N., 1994, Demonstration of hydrogen mixed gas vehicles. *Hydrogen Energy Progress X*, p. 1781.
 20. Das, L., M., 1996, Utilization of hydrogen-CNG blend in internal combustion engine. *Hydrogen Energy Progress XI*, p. 1513.
 21. Liu, Z. ve Karim, G., A., 1995, Knock characteristic of dual-fuel engines fuelled with hydrogen fuel. *Int. J. Hydrogen Energy*, 20, (11), 919-924.
 22. Liu, Z. ve Karim, G., A., 1995. Knock characteristic of dual-fuel engines fuelled with hydrogen. *Hydrogen Energy Progress XI*. p. 1807.
 23. Petkov, T., Veziroğlu, T. ve Sheffield, J., W., 1989, An outlook of hydrogen as an automotive fuel. *Int. J. Hydrogen Energy*, 14, (7), 449-474.
 24. Das, L., M., 1990. Fuel induction techniques for a hydrogen operated engine. *Int. J. Hydrogen Energy*, 15, (11). 833-842.
 25. DeLuchi, M., A., 1989, Hydrogen vehicles : an evaluation of fuel storage, performance, safety, environmental impacts and cost. *Int. J. Hydrogen Energy*, 14, (2), 81-130.
 26. Dipioğlu, İ., 1998, Hidrojenin araç üzerinde üretimi ve petrol kökenli yakıtlarla birlikte içten yanmalı motorlarda kullanımının incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Konya.
 27. Hollmuller, P., Joubert, J., Lachal, B. ve Yvon, K., 2000, Evaluation of a 5 kW_p photovoltaic hydrogen production and storage installation for a residential home in Switzerland. *Int. J. Hydrogen Energy*, 25, 97-109.

28. Cohn, D., R., Rabinovich, A., Titus, C., H. ve Bromberg, L., 1997, Near-term possibilities for extremely low emission vehicles using onboard plasmatriation generation of hydrogen. *Int. J. Hydrogen Energy*, 22, (7), 715-725.
29. Bockris, J., O'M., Veziroğlu, T. N. ve Smith, D., 1991. *Solar-Hydrogen Energy The Power to Save the Earth*. Macdonald & Co. Ltd., London.
30. Özay, K., 1997, System Comparison of Hydrogen with Other Alternative Fuels in Terms of Epaact Requirements. A Thesis, University of Miami Mechanical Engineering, Coral Gables, Florida.
31. Krepec, T., Miele, D. ve Lisio, C., 1990. Improved concept of hydrogen on-board storage and supply for automotive applications. *Int. J. Hydrogen Energy*, 15, (1), 27-32.
32. Aceves, S., M., Berry, G., D. ve Rambach, G., D, 1998. Insulated pressure vessels for hydrogen storage on vehicles. *Int. J. Hydrogen Energy*, 23, (7), 583-591.
33. Furuham, S., 1989, Hydrogen engine systems for land vehicles. *Int. J. Hydrogen Energy*, 14, (12), 907-913.
34. Ford Motor Company, 1993, *Ford Power Products MVH Range Manuel*, Somerset.
35. Durgun, O., 1989. Motorlarda Deneysel Yöntemler. K.T.Ü. Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Fakülte Ders Notları. No: 22.
36. Cussons Technology, 1993, *Cussons Automotive Multi-Cylinder Engine Test Bed-Hydrokinetic Dynamometer*. Manchester.
37. Cussons Technology, 1993. *Compuflow Gravimetric Fuel Flow Meters*, Manchester.
38. Borat, O., Balcı, M. ve Sürmen, A., 1994. İçten Yanmalı Motorlar. İ.T.Ü Makina Fakültesi Otomotiv Anabilim Dalı. İstanbul.
39. Arslan, H..E., 1996, *Taşıt Motorlarında Araştırma ve Deney Teknikleri*. İstanbul.
40. Testo, 1998, *Instruction Manual*, Lenzkirch.
41. VLT Diagnostik AG, 1994, *VLT 3040-K/S Exhaust Gas Diagnostic System*, Switzerland.
42. Cussons Technology, 1988, *Cussons Exhaust Gas Calorimeters*, Manchester.

43. Cussons Technology, 1990, Cussons Coolant Flow Meter. Manchester.

44. Cole-Parmer, 1999, Cole-Parmer 150-mm Correlated Flowmeters. Chicago.

