

# BİR DİZEL MOTORUN DOĞAL GAZLA ÇALIŞIR HÂLE GETİRİLMESİ VE DÖNÜŞTÜRÜLMÜŞ MOTORUN PERFORMANS VE EGZOZ EMİSYONUNUN DENEYSEL ANALİZİ

## Burak Sezgin

Mak. Yük. Müh., AYESAŞ,  
Titanyum Blok, Teknokent,  
Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara

## Kemal Bilen\*

Yrd. Doç. Dr., Yıldırım Beyazıt Üniversitesi,  
Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fak.,  
Makina Mühendisliği Bölümü, Ankara  
kemal.bilen@ybu.edu.tr

## Veli Çelik

Prof. Dr., Kırıkkale Üniversitesi,  
Mühendislik Fakültesi,  
Makina Mühendisliği Bölümü, Kırıkkale

## ÖZET

Bu deneysel çalışmada; içten yanmalı bir dizel motor, çeşitli değişikliklerle, sıkıştırılmış doğal gazla (CNG) çalışır hâle getirilmiştir. Dizel motorlarda doğal gaz kullanıldığında doğal gazın yüksek oktan sayısı, yüksek sıkıştırma oranlarında vuruntuya sebep olacaktır. Bunun önüne geçmek için motorun çalışma prensibini değiştirmek gerekir.

Yüksek oktan sayısına sahip doğal gaz, bu özeliği nedeniyle benzinle benzerlikler gösterdiği için, doğal gazla çalışan motorların çevriminin de benzinli motorların çevrimine benzemesi gerekir. Dizel çevrime göre çalışan bir motoru, benzinli motorların çalışma prensibi olan Otto çevrimiyle çalışacak hâle getirmek için, yanma odasında bazı değişiklikler yaparak sıkıştırma oranını düşürmek gerekmektedir. Bu deneysel çalışmada; bazı değişiklikler yapılarak, bir dizel motor doğal gaz ile çalışır hâle getirilmiş ve söz konusu bu motorun performans ve egzoz emisyonu testleri yapılarak elde edilen sonuçlar grafikler halinde sunulmuştur. Deneysel sonuçlar, dönüştürülmüş motorun gücünde ortalama %15 ile %24 arasında bir düşüşün olduğunu göstermiştir. Fakat bu dönüşümün egzoz emisyonunda ve yakıt tüketiminde sağladığı düşüş dikkate alındığında, motor gücünde oluşacak kayıplar %20'ye kadar kabul edilebilir sayılmaktadır.

**Anahtar Kelimeler:** Alternatif yakıtlar, doğal gaz, CNG, dizel motor modifikasyonu, sıkıştırma oranı

## Modification of a Diesel Engine to Natural Gas and Experimental Analysis of Modified Engine Performance and Exhaust Emission

## ABSTRACT

In this experimental study; an internal combustion diesel engine was modified to compressed natural gas (CNG). If CNG is used instead of diesel fuel in a diesel engine, high octane number of natural gas will cause self knocking in high compression ratios. This fault can only be prevented by changing the working principle of the engine.

CNG is similar to gasoline because of high octane number. Therefore, the cycle of the CNG engines must resemble the cycle of gasoline engines, which work according to Otto principle. To convert a diesel engine to an Otto engine, it is obligated to reduce the compression ratio along with some modifications in the combustion chamber. In this experimental study, a diesel engine was modified to work with CNG with necessary modifications. The performance and exhaust emission tests were carried out and the results were presented graphically. The results indicate that the average loss of engine power is between 15% and 24% after the modification. In such modifications, if emission reduction and economic gain are considered the loss of engine power up to 20% is accepted reasonable.

**Keywords:** Alternative fuels, natural gas, CNG, diesel engine modification, compression ratio

\* İletişim yazarı

Geliş tarihi : 28.01.2013

Kabul tarihi : 21.05.2013

Sezgin, B., Bilen, K., Çelik, V. 2013. "Bir Dizel Motorun Doğal Gazla Çalışır Hâle Getirilmesi ve Dönüştürülmüş Motorun Performans ve Egzoz Emisyonunun Deneysel Analizi," Mühendis ve Makina, cilt 54, sayı 642, s. 41-51.

## 1. GİRİŞ

Enerji, toplumların varlıklarını sürdürebilmeleri için gerekli en önemli unsurlardan biridir. Amerika’da varlığını sürdüren uluslararası enerji ajansı (IEA) raporlarına göre, dünyanın petrol rezervinin yakın sayılabilecek bir gelecekte biteceği anlaşılmaktadır. Kaynaklarda [1], enerji kaynakları kullanımında değişiklik yapılmazsa, küresel çapta enerji açığının ve kirliliğin 2030 yılına kadar %50 artacağı uyarısında bulunmaktadır. Bu durum; toplumların, mevcut enerji kaynaklarını daha verimli kullanmalarını ve yeni ve yenilenebilir enerji kaynakları bulmalarını kaçınılmaz kılmaktadır.

Petrol tüketiminde önemli bir paya sahip otomobillerin insanlara sağladığı ulaşım rahatlığı ve hareket özgürlüğü büyüktür. Ancak otomobiller; egzozlarından çıkan gazlarla şehir havasını, dolayısıyla tüm atmosferi kirleterek sera etkisi dediğimiz ve gittikçe artan tehlikeyi de beraberinde getirmektedir. Motorlu taşıtların havayı kirletmelerinin temel nedeni içten yanmalı motorların yeterince verimli çalışmamlarıdır. Bu durum; yarı yanmış ya da hiç yanmamış yakıtın; CO, hidrokarbon, ya da kurum olarak motordan atılmasına yol açmaktadır [2].

Yakıt tam yandığında çıkması gereken atık, CO<sub>2</sub> ve sudur. Ayrıca havadaki azot, yüksek basınç ve sıcaklık altında azotoksit oluşturmaktadır. Taşıt egzozlarından, özellikle benzin motorlu taşıtların egzozlarından çıkan karbonmonoksit, hidrokarbon ve azot bileşikleriyle parçacıkların meydana getirdiği çevre sorunları, birçok şehirde ciddi boyutlara ulaşmıştır. Bu nedenle motorlu taşıt egzoz gazlarından kaynaklanan hava kirliliği, kalıcı önlemleri gerektiren önemli bir çevre sorunu haline gelmiştir [2].

Küresel ısınmanın kaynağı olan sera etkisini en çok tetikleyen gaz CO<sub>2</sub> gazıdır. CO<sub>2</sub> gazı her yanma reaksiyonunda çeşitli miktarlarda oluşur. Tam yanma olmaması halinde meydana gelen CO gazı ise ozon tabakasına zarar verir. Ayrıca, CO gazı kandaki hemoglobinle bileşik oluşturarak zehirli etki de oluşturur. Hidrokarbonlar ve CO solunum güçlüğü oluştururlar, ayrıca çoğu hidrokarbonun da zehirli etkisi mevcuttur. Yanma sonucu ortaya çıkan azotoksitlerin (NO<sub>x</sub>) kanserojen etkisi olduğu düşünülmektedir.

Bu ve bunun gibi sebeplerden dolayı tüm dünya, bazı önlemlerin alınması gerekliliğinin farkına varmıştır. 1992’de kabul edilen Birleşmiş Milletler iklim değişikliği sözleşmesine ek olarak, 1997 yılında Japonya’da Kyoto protokolü kabul edilmiştir. Kyoto protokolü kriterleri, CO<sub>2</sub> emisyon değerleri yüksek olan şirketlere CO<sub>2</sub> kredisi kullanma zorunluluğu getirmiş ve bu durum CO<sub>2</sub> emisyon ticareti ve borsasını ortaya çıkarmıştır.

Günümüzde hava kirliliğini önlemek için birçok ülkede eg-

zoz emisyonları sıkı kurallarla denetim altına alınmış ve her aracın emisyon limiti mümkün olan en düşük seviyeye indirilmiştir. Avrupa Birliği (AB), dizel yakıt kullanan araçların emisyon standartlarını 1990’larda Euro 1 standartları ile belirlemiş, bu standartları yıllar içinde sıkılaştırmıştır. ABD’de çevre koruma ajansı (EPA) da benzer standartlar belirlemiştir. Japonya, Avustralya ile Asya ve Latin Amerika’daki bazı ülkeler özel emisyon düzenlemeleri hazırlamış ve bunları geliştirmektedir. Son kısıtlamalar NO<sub>x</sub> salınımını şimdikininkin üçte birine indirmeyi hedeflemektedir.

İngiltere’de Londra civarında düşük emisyon bölgesi çalışmaları neticesinde, İngiltere dışında bir ülkeye kayıtlı, 12 tonun üzerinde, Londra’dan geçen ve şu anda Londra düşük emisyon bölgesinin standartlarını karşılayamayan kamyonlar, Londra’da dolaştıkları her gün için 200 £ ödemektedirler.

Bu ve bunun gibi kısıtlamaların çevreye katkısı yanında ekonomik etkisi de göz önünde bulundurulması gereken diğer bir husustur. Taşıtların egzoz gazlarına getirilen kısıtlamalar, birçok taşıtı trafiğe çıkamama tehlikesiyle karşı karşıya getirmektedir. Türkiye gibi gelişmekte olan ülkelerin ekonomisi düşünüldüğünde; AB emisyon standartlarını karşılayamayan taşıtların trafikten çekilmesi, bunların yerine yurt dışından AB emisyon standartlarını karşılayan araç ithalatı gibi durumların, ülkelerin ekonomisine, altından kalkılması güç olan bir darbe vuracağı kaçınılmazdır.

Birincil enerji kaynakları bakımından kendine yetemeyen bir ülke durumunda olan ülkemiz, bilindiği gibi, petrol ihtiyacının %80’den fazlasını ithalat yolu ile karşılamaktadır. Bu durum devam ettiği sürece, yeni enerji kaynaklarının veya mevcut enerji kaynaklarının daha verimli kullanımının araştırılmasının önemi de artmaktadır. Örneğin otomotiv sektöründe kullanılan içten yanmalı motorlarda (İYM) petrol yerine; bitkisel yağlar, güneş enerjisi, LNG, LPG, CNG ve CPG kullanımını araştırılmaktadır.

Teorik olarak dizel çevrimle çalışan bir motoru, motorda bazı değişiklikler yaparak alternatif yakıtlarla çalıştırmak mümkündür. Başta doğal gaz olmak üzere, fosil yakıtlara alternatif olan bu yakıtların, petrolden elde edilen yakıtlara göre daha az emisyon ürettiği bilinmektedir. Dolayısıyla aracı trafikten çekmek yerine, kullandığı yakıtı değiştirerek emisyon değerlerini azaltmak; hem doğal gazın düşük emisyon değerleri nedeniyle çevre kirliliğini azaltmak, hem de Türkiye de dâhil olmak üzere tüm dünyada yoğun rezervinin bulunması ve petrole göre daha ucuz olması nedeniyle ülke ekonomisine katkıda bulunmak demektir.

Kaynaklarda [3], 2011 yılı itibarıyla; dünya petrol rezerv ömrünün, yeni keşifler yapılmadığı takdirde bugünkü üretim seviyesiyle 44.8 yıla, dünya doğal gaz rezerv ömrünün ise 57.07 yıla düşmüş olduğu ifade edilmektedir. Bu durum dün-

ya genelinde, petrole nazaran doğal gazla doğru bir yönelişin yerinde olacağını göstermektedir.

Goyal ve Sidhartha [4] tarafından, Hindistan’ın başkenti ve hava kirliliği açısından dünyanın en önde gelen şehirlerinden Delhi’de yapılan bir çalışmada; 2001-2003 yılları arasında on binlerce motorlu taşıtın CNG’ye dönüştürülmesinin hava kalitesi üzerindeki etkisi incelenmiştir. Delhi’de yapılan bu çalışmada, CNG’ye dönüşümün; CO, SO<sub>2</sub>, PM ve NO<sub>x</sub> emisyonlarında kayda değer bir düşüş sağladığı tespit edilmiştir.

Poompipatpong ve Cheenkachorn [5] tarafından yapılan deneysel bir çalışmada; gaz yakıt kullanarak motor performansını optimize etmek için, bir dizel motor CNG’ye dönüştürülmüştür. Farklı sıkıştırma oranlarında ve farklı motor devir sayılarında; motor performans parametreleri ve emisyon değerleri ölçülerek, içten yanmalı motorların değerlendirilmesinde iki temel kriter olan performans ve emisyon arasında bir optimizasyon sağlanmaya çalışılmıştır.

Cohen [6] tarafından yapılan teorik bir çalışmada; konvansiyonel dizel (CD), emisyon kontrollü dizel (ECD) ve CNG ile çalışan motorlar, emisyon ve maliyet açısından karşılaştırılmıştır. ECD ve özellikle CNG motorların, CD motorlara göre oldukça düşük emisyon değerlerine sahip olduğunun tespit edildiği bu çalışmada; ECD motorların CNG motorlara göre çok daha ekonomik olduğu vurgulanmıştır.

İşte yukarıdaki hususlar göz önüne alınarak bu çalışmada; dizel çevrime göre çalışan bir motorun doğal gazla çalışır hâle getirilmesi analiz edilmiştir. Deutz Magirus marka F4L912 model, 4-silindri ve hava soğutmalı ticari amaçlı bir dizel motorunda gerekli değişiklikler yapılmış ve dönüştürülmüş motorun performansı ve egzoz emisyon değerleri irdelenmiştir.

## 2. DİZEL MOTORLARDA EMİSYON OLUŞUMU

Dizel motorlarında yanma ve egzoz emisyonlarının oluşumu kaynaklarda [7] şu şekilde yer alır: Sprey haldeki yakıt hava dağılımına ve her bir bölgedeki yanma mekanizmasına göre yanma odası üç bölgeye ayrılır. Birinci bölge, en yüksek eşdeğerlik oranına (ekivalans oranına) sahip olan bölgedir ve en uzun yanma burada olur. Bu bölge katı karbon parçalarının ve NO emisyonlarının kaynağıdır. İkinci bölge ön karışımli bölgedir ve ilk tutuşma yanması burada oluşur ve bu bölgede önemli bir miktarda emisyon oluşmaz. Üçüncü bölgede, eşdeğerlik oranı (EO) olan ψ, düşük olduğundan yanma iyi olmaz. Bu nedenle bu bölgede HC emisyonları oluşabilmektedir.

### 2.1 Karbonmonoksit (CO) Oluşumu

Yanma ürünleri arasında CO bulunmasının ana nedeni oksije-

nin yetersiz olmasıdır. Yanma odasının tümü ele alındığında oksijen genel olarak yetersiz olabileceği gibi karışımın tam olarak homojen olmaması durumunda yanma odasının belirli bir konumda yerel olarak da yetersiz olabilir. Temel olarak CO oluşumu hava fazlalık katsayısının (HFK) kuvvetli bir fonksiyonu olarak değişmektedir.

### 2.2 Karbondioksit (CO<sub>2</sub>) Oluşumu

Yanma sırasında alev cephesinin iç tarafında ulaşılan yüksek sıcaklık bölgesinde çok miktarda CO oluşmaktadır. Ancak gazların daha sonra genişlemesi ve soğuması sırasında oksidasyon sonucu CO, CO<sub>2</sub>’ye dönüşmektedir.

### 2.3 Azot Oksit (NO<sub>x</sub>) Oluşumu

Yanma sonucu ulaşılan yüksek sıcaklıklarda havanın içerisindeki azotun oksijen ile birleşmesi sonucu azot oksitler meydana gelmektedir. NO<sub>x</sub> içerisinde ana eleman olarak azot bulunmaktadır. Egzoz gazlarının daha sonra atmosfere atılması sonucu oksijenle temasında NO’nun bir kısmı NO<sub>2</sub> ve öteki NO<sub>x</sub>’lere dönüşmektedir. Bu bakımdan NO<sub>x</sub> oluşumunu etkileyen iki önemli parametre yanma odası sıcaklığı ve hava/yakıt oranıdır.

### 2.4 Partikül Madde (PM) Oluşumu

Partikül maddeler; katı parçacıklar, duman veya is olarak da tanınır. Dizel motorunda hem karışım, hem de yakıt cinsi PM’lerin oluşumuna sebep olmaktadır. Oksijence fakir ortamda bulunan yakıt moleküllerinin ısı parçalanması, özellikle H’lerin kolayca oksitlenmesi, C’ların ise oksitlenmeden ortamda çoğalması durumunda PM’ler oluşur. İS, bu durumda oluşan katı karbon tanecikleridir. Gücü arttırmak amacıyla yanma odasına fazla miktarda yakıt gönderildiğinde, yeterli oksijen bulunmadığı için egzoz gazları içerisinde bir miktar is bulunacaktır.

### 2.5 Hidrokarbon (HC) Oluşumu

Karışımın zengin veya fakir olması HC emisyonunu etkilemektedir. HFK’nın 1.1 değeri civarında HC’lar minimumdan geçerek bu değerin her iki yanında da artış göstermektedir. HFK’nın büyük olması durumunda yanma odası sıcaklığı düşeceği için tam yanma olmaz ve HC’lar artar. Karışımın zengin olması durumunda ise yeterli oksijen bulunmadığı için yakıtın tümü yanamaz ve tekrar HC’lar artış gösterir. Motor-daki HC emisyonu çoğunlukla tam yanma olmayan bölgelerde oluşmaktadır. Hidrokarbonlar, çok çeşitli organik kimyasal maddeler içerirse de toksin etkiye sahip bulunmamaktadırlar. Ancak, havadaki diğer kirleticiler arasındaki reaksiyonlarda rol oynamaları nedeniyle kirletici olarak önem kazanmaktadırlar.

### 3. BİR DİZEL MOTORUN DOĞAL GAZA DÖNÜŞTÜRÜLMESİ

#### 3.1 Doğal Gazın Araçlarda Kullanımı

Birçok batı ülkesinde doğal gazın araçlarda kullanımıyla ilgili çalışmalar ve araştırmalar büyük bir hızla devam etmektedir. Bu konuda, dünyada en fazla kara nakil aracı kullanılan ABD'yi incelemek gerekir. Dünyada mevcut 520 milyon otomobil ve kamyonun 190 milyonu bu ülkededir. Hava kirliliğinin ortalama %50'sinin bu araçların egzozlarından ortaya çıktığı ABD'de, CNG'li araçların üretildiği ve mevcut araçların bir kısmının da CNG'ye dönüştürüldüğü bilinmektedir.

Ülkemizde de; İstanbul, Ankara, Adana, Sakarya, Bursa, Afyon, Bolu ve Eskişehir'de belediye otobüslerinin egzoz gazlarının neden olduğu hava kirliliğini azaltmak için birtakım projeler geliştirilmekte olup doğal gaz dönüşümleri tamamlanan otobüslerin kullanımına başlanmıştır [8].

Yeni Zelanda'daki NGV Global firmasının [9] 2011 yılı verilerine göre; dünyada doğal gazla çalışan araçların sayısı 15.192.844, dolun istasyonu sayısı 18.202, Türkiye'de doğal gazla çalışan araçların sayısı 3339, dolun istasyonu sayısı ise sadece 12'dir.

Kaynaklarda [10], doğal gazın hem buji ile ateşlemeli hem de sıkıştırma ile ateşlemeli motorlarda önemli dönüşümleri gerektirmeksizin ve dikkate değer performans kaybına yol açmaksızın kullanılabilmesi ifade edilmektedir. Yapılan bir deneysel çalışmada [10], benzin motorunun doğal gazla çalıştırılmasının tork ve güç değerlerini bir miktar azalttığı, ancak özgül enerji maliyetinin düşük olması nedeniyle, hem benzin motorunda, hem de dizel motorundaki çift yakıtlı kullanımında, benzinli ve dizel çalışmalarına göre daha ekonomik olduğu tespit edilmiştir.

Yüksek performansa ve düşük emisyonlara sahip bir doğal gaz motorunun yapımı, doğru sıkıştırma oranının tespiti ile sağlanmaktadır. Bu oran her motor için değişebilir. Sıkıştırma oranının artırılmasını motor vuruntusu sınırlamaktadır. Doğal gazın yüksek oktan sayısına sahip olması sıkıştırma oranının artırılabilmesini sağlamaktadır. Genel olarak benzin motorlu taşıtlarda sıkıştırma oran 10:1 ve benzinin oktan sayısı 90'dır. Fakat ortalama olarak doğal gaz motorunda sıkıştırma oranı 12:1 ve doğal gaz-

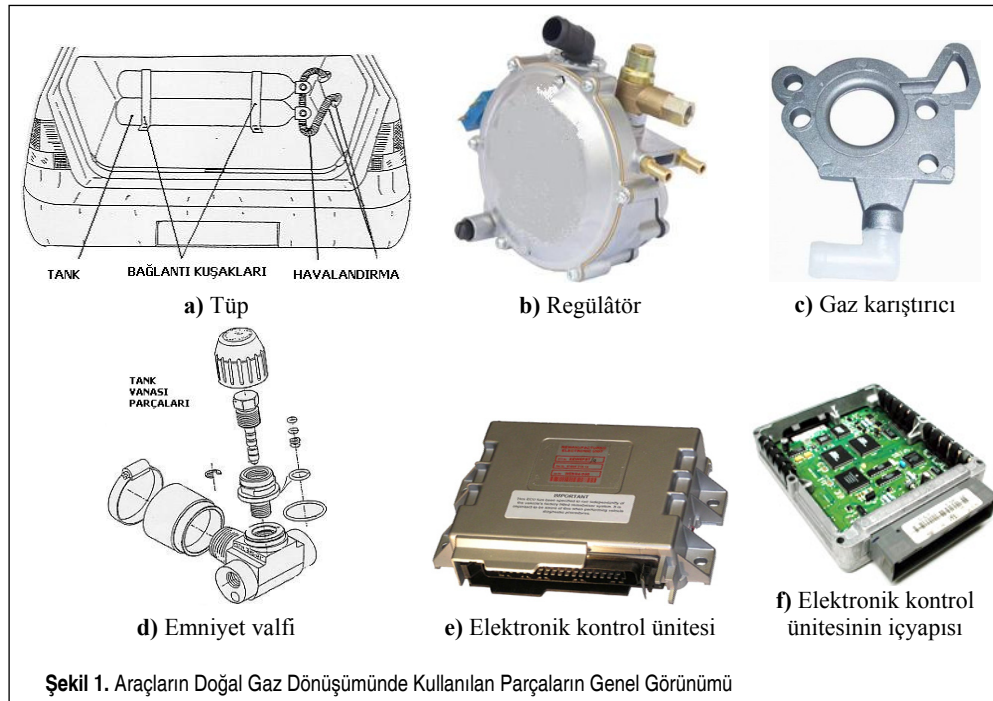
zın oktan sayısı ROS 130, MOS 105'dir. Oktan sayısı yakıtın kalitesine göre daha da az olabilmektedir. Yüksek oktan sayısı demek; vuruntunun ortadan kalkması, daha uzun buji ömrü, yağlama yağının daha fazla kullanımı ve soğuk havalarda iyi çalışma demektir. Doğal gaz motorlarında sıkıştırma oranının mümkün olduğunca yüksek tutulması önemlidir. Sıkıştırma oranının artırılması ısı veriminin yükselmesini sağlar. Isıl verimin yükselmesi de yakıt tüketiminde azalma demektir.

#### 3.2 Araçların Doğal Gaz Dönüşümünde Kullanılan Parçalar

Araçların doğal gaz dönüşümünde kullanılan parçalar genel olarak; tüp, regülâtör, gaz karıştırıcı, emniyet valfi ve elektronik kontrol ünitesi (ECU veya ECM) şeklindedir. Aşağıda görevleri ve genel özellikleri açıklanan bu parçalara ilişkin resimler, Şekil 1'de gösterilmiştir.

**Tüp:** Doğal gazı depolamaya yarayan elemandır. Şekil 1a'da gösterildiği gibi genellikle bagaja konulur. Bazı durumlarda tavana ya da araç altına da monte edilebilir. Sistemin en yüksek emniyete sahip olması gereken parçasıdır. Çeşitli büyüklüklerde olabilir.

**Regülâtör:** Genel görünümü Şekil 1b'de gösterildiği gibidir. CNG gaz fazında yüksek basınçla valften geçip regülâtöre ulaşır. Regülâtörde basınç düşürülür ve atmosferik değerde tutulur. Regülâtörde basınç 3 kademede düşürülür; 1. kademede 200 bar'dan 5 bar değerine, 2. kademede 1.5-2 bar değerlerine, 3. kademede ise 650-800 mbar değerlerine getirilir. Donmayı önlemek için motor soğutma suyu devresine yakın bağlanır.



Şekil 1. Araçların Doğal Gaz Dönüşümünde Kullanılan Parçaların Genel Görünümü

**Gaz karıştırıcı:** Hava ile yakıtın karıştırıldığı merkezdir ve yapısı Şekil 1c'de gösterilmiştir.

**Emniyet valfi:** Şekil 1d'de gösterildiği gibi mekanik ya da elektronik olabilirler. Manüel olarak ya da tehlike anında otomatik olarak kapatılabilirler.

**Elektronik kontrol ünitesi:** Şekil 1e'de fotoğrafı ve Şekil 1f'de ise iç yapısı verilen ECU, belirli noktalardan aldığı verileri analiz ederek motorun yakıt yönetimini sağlayan birimdir.

#### 3.3 Dizel Motorlarda Doğal Gazın Tek Yakıt Olarak Kullanılması

Tek yakıtlı sistemlerde motorun çalışma prensibi, dizel çevrimden Otto çevrimine dönüştürülür. Dizel motorlar CNG'ye dönüştürülürken, yanmanın düzenli ve kontrollü olması için benzinli motor prensibine (Otto çevrimine) geçilmesi zorunludur. Böylece, buji ile ateşlemeli motora geçilmiş olur. Bunun için enjektörler bujilerle değiştirilir, motorun silindir kafasında değişiklikler yapılır. CNG'ye dönüştürülmüş motorların yakıt sarfiyatlarının azalmasına karşılık dönüşüm maliyetleri yüksektir.

#### 3.4 Dizel – CNG Çift Yakıt Sistemleri

Çift yakıtlı motorlarda silindir içindeki doğal gaz-hava karışımının tutuşmasını sağlamak amacıyla, motorun kendi püskürtme sistemi ve püskürtme pompası kullanılarak pilot dizel yakıtı püskürtülür. Bu amaçla, silindire sokulan toplam enerjinin %5-10 kadarına denk miktarda dizel yakıt, sıkıştırma zamanı sonunda silindire püskürtülür. Püskürtme anında tutuşan pilot yakıt yardımıyla karışım tutuşur. Motor yükünün değişmesi halinde dizel yakıt miktarının sabit kalmasına karşılık doğal gaz miktarı değişmektedir. Böylece kısmi yüklerde doğal gaz oranı düşmekte, rölantide çalışmada ise hiç doğal gaz kullanılmamaktadır.

Pilot püskürtme demetinin enerjisi, bujide sağlanan enerjinin 102-104 katı kadardır. Böylece, hava fazlalık katsayısı olan  $\lambda$ 'nın, 1.4-2'lik değerlerinde de ilk tutuşma garanti edilmektedir. Daha da önemlisi, pilot püskürtmeyle oda şekline uygun püskürtme demeti oluşturularak, ayrıca silindir içinde yaratılan hava hareketinin de yardımıyla yanmanın, odanın her noktasında aşağı yukarı aynı anda başlaması sağlanmaktadır. Bu şekilde 16-17'lik sıkıştırma oranlarında vuruntusuz yanma elde edilebilmektedir. Pilot püskürtme dizel motorunun orijinal enjektörü ile yapılırsa, bu enjektörün deliği pilot püskürtme debileri için göreceli olarak büyük kaldığından, demetin kalitesi kötü olacaktır; yani demet derinliği az, damlacık çapları büyük

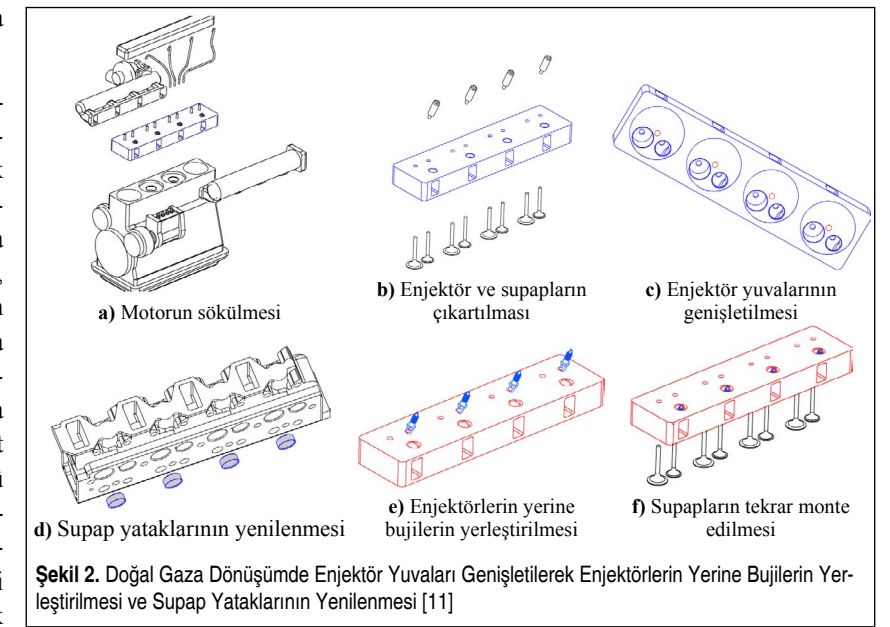
olacaktır. Yanma odası içine oldukça homojen dağılmış olan gaz-hava karışımı, bazı noktalarda tam olarak yanamaz. Bu durumda zararlı egzoz emisyonlarında ve yakıt tüketiminde artış görülmektedir. Ancak orijinal püskürtme enjektörü kullanmanın en büyük avantajı motorun çalışması sırasında doğal gaz veya dizel yakıtına geçişe olanak sağlamasıdır.

Delik çapı, pilot püskürtmenin yakıt debisine uydurulmuş, daha küçük delikli enjektör kullanılırsa, yanma verimi ve emisyon açısından bir sorun olmayacaktır. Bu durumdaki yakıt tüketimi ve emisyon değerleri yaklaşık normal dizel yakıtıyla elde edilen seviyeye, bazen de daha aşağıya inmektedir.

Doğal gazın silindir içerisine enjekte edilmesi istendiğinde motor konstrüksiyonunda değişiklik yapılması gerekmektedir. Motor silindir kafasında değişiklik yapılmalı ve yakıt olarak gelen doğal gazın basıncı yükseltilmelidir. Sıkıştırma işlemi sonuna doğru, gaz yakıt ayrı bir enjektör vasıtasıyla silindir içerisine enjekte edilir. Burada sıkıştırma sonunda silindir içerisine enjekte edilen pilot yakıtın püskürtme avansı önemlidir. Bu avansın azaltılması gerekir, azaltılmadığı takdirde güçte düşme yaşanır. Pilot yakıt yardımıyla sıkıştırma sonunda silindir içerisinden tutuşma temin edilir. Bu sistemde, silindir kafası içinde, biri gaz diğeri pilot yakıt olmak üzere iki enjeksiyon valfine ihtiyaç duyulmaktadır. Motorun normalde olduğu gibi aynı güçte çalışabilmesi için ya yüksek basınçlı gaz enjeksiyonu ya da gaz yakıtla beraber dizel yakıtının kullanılması gerekmektedir.

#### 3.5 Motor Uyarlamaları

Daha önce de ifade edildiği gibi; bir dizel motoru doğal gazla çalıştırmanın bir yöntemi, yanma odasını uyarlayarak, motoru buji ile ateşlemeli bir hâle dönüştürmektir. Bu değişikliklerin



Şekil 2. Doğal Gaz Dönüşümünde Enjektör Yuvaları Genişletilerek Enjektörlerin Yerine Bujilerin Yerleştirilmesi ve Supap Yataklarının Yenilenmesi [11]

temel amacı, sıkıştırma oranını düşürerek vurutuya engel olmaktır. Bu değişiklikler sırasıyla şu şekilde yapılır:

**Silindir kafasında yapılan değişiklikler:** Motor sökölür, supaplar ve enjektörler çıkartılır, enjektör yuvaları genişletilir, enjektör yuvalarına bujiler yerleştirilir, supap yatakları yenilenir ve supaplar tekrar monte edilir. Bu işlemler Şekil 2'de sırasıyla şematik olarak gösterilmiştir.

**Pistonlarda yapılan değişiklikler:** Bir dizel motoru tek yakıtlı CNG motoruna dönüştürmek için mevcut pistonlarda, Şekil 3'te de gösterildiği gibi bazı değişiklikler yapmak gerekir. Mevcut piston hiçbir değişikliğe uğramadan kullanılsa yaklaşık 17:1'lik bir sıkıştırma oranı vurutuya sebep olacaktır. Bu sebeple yanma odası hacmi genişletilmelidir. Bu dönüşüm şu şekilde yapılır: Öncelikle pistonlar sökölür, sonra Şekil 3a'da gösterildiği gibi motorun sıkıştırma oranını, hesaplanan değere düşürmek için piston üzerindeki hacim genişletilir. Şekil 3b'de ise, dizel ve CNG motorlarına ait pistonların karşılaştırılması yapılmıştır. Daha sonra, üzerindeki hacim genişletilmiş pistonlar, Şekil 3c'de gösterildiği gibi motora tekrar monte edilir.

Dönüşümü yapılmış pistonların montajından sonra takip edilen aşamalar, Şekil 4'te gösterilmiştir. Buna göre ilkönce; Şe-

kil 4a'da gösterildiği gibi gaz vanasının montajı yapılır. Daha sonra motora elektronik kontrol ünitesi (ECU) monte edilir. ECU'nun görevi, yakıt-hava karışımı oranını ayarlamayı sağlamaktır. Bu oranı ayarlamak için egzoz gazındaki oksijen oranı ölçülmeli ve ECU'ya sinyal gönderilmelidir. Motorun egzoz çıkışına takılan ve lamda sensörü adı verilen bir cihaz, egzoz gazından aldığı bilgileri ECU'ya gönderir ve ECU da yakıt-hava karışımı oranını ayarlar. Örnek olarak eğer egzoz gazında fazla miktarda oksijen varsa bu durum, yakıt-hava karışımındaki yakıtın yetersiz olduğunu gösterir ve ECU bu bilgi doğrultusunda yakıt-hava karışımındaki yakıt miktarını artırır. Şekil 4d'de ise, lamda sensörünün motor bloğundaki konumu verilmiştir. Şekil 4e'de görüldüğü gibi regülâtörün bağlanması gerçekleştirilir ve sistem Şekil 4f'deki hali olarak tamamlanır.

## 4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

### 4.1 Deneylerde Kullanılan Ekipmanlar

#### Dizel Motor

Deneylerde kullanılan, Deutz Magirus marka F4L912 model, 4-silindirli ve hava soğutmalı ticari amaçlı dizel motorunun resmi Şekil 5'te gösterilmiştir. Söz konusu deney motorunun teknik özellikleri ve bazı çalışma koşulları ise Tablo 1'de verilmiştir.

#### Şasi Dinamometresi

Şasi dinamometreleri, araç motorlarında yapılan tüm değişikliklerin atölye içinde ölçülmesi için gerçek yol şartlarını sağlayan cihazlardır. Bu cihazların hidrolik ve elektronik tipte olanları vardır. Şasi dinamometresinde ölçülen gücün özeliği, tekerlek gücü olmasıdır. Yani



Şekil 5. Deneylerde Kullanılan Deutz Magirus Marka ve F4L912 Model Dizel Motor

Tablo 1. Deneylerde Kullanılan Motorun Teknik Özellikleri ve Bazı Çalışma Koşulları

Özelik	Değeri		
Silindir çapı/Strok (mm/mm)	100/120		
Hacim (lt)	3.77		
Çeşitli devir sayılarındaki gücü [(kW/(d/dk))]	32/1500	38/1800	46/2300
Sıkıştırma oranı	17:1		
Dış ölçüleri (L·B·H) (mm·mm·mm)	860·673·820		
Yanma havası debisi (m³/dk)	2.83		
Egzoz gazı debisi (m³/dk)	2.91		
Egzoz gazı sıcaklığı (°C)	500		
1800 d/dk'daki özgül yakıt tüketimi (g/kW·h)	232		

motordan tekerleklere kadar olan tüm sürtünmeler bu gücün dışındadır. Burada ölçülen güç, araca hareket veren tekerleklerden alınan ve tamamı faydalı olan güçtür. Ölçümler, motor araç üzerinde iken yapılır. Araca hareket veren tekerlekler, cihazın silindirleri (tamburları) üzerine bindirilir. Motor çalıştırılır ve vitese takılır. Tekerlekler tamburlar üzerinde döner. Cihazın fren tertibatı yardımıyla, tamburların döndürülmesi, istenildiği kadar zorlaştırılır. Bu şekilde motorun, istenilen devir sayısında değişik yüklerle yüklenmesi sağlanır. Motorun, dinamometre tamburlarını döndürmek için harcadığı güç, cihazın göstergesinden okunur. Şekil 6a'da deneylerde kullanılan şasi dinamometresi görülmektedir.

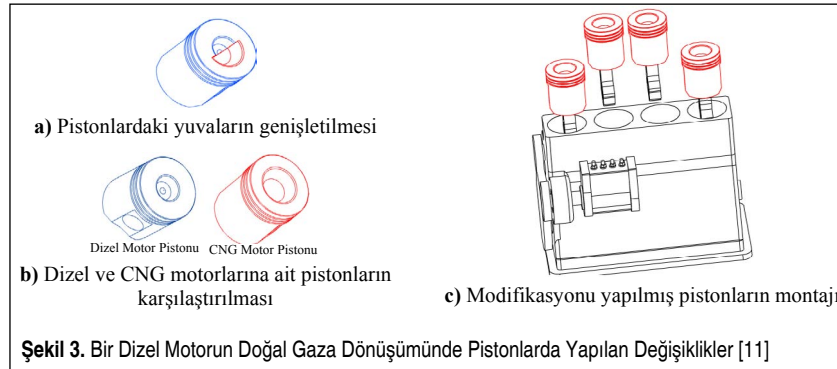
#### Emisyon Ölçüm Cihazı

Deneylerdeki emisyon analizleri için, Şekil 6b'de gösterilen KT 2030 tipi bir emisyon ölçüm cihazı kullanılmıştır. Ölçümleri hacimsel olarak yapan cihaz; CO, CO<sub>2</sub>, HC ve PM emis-

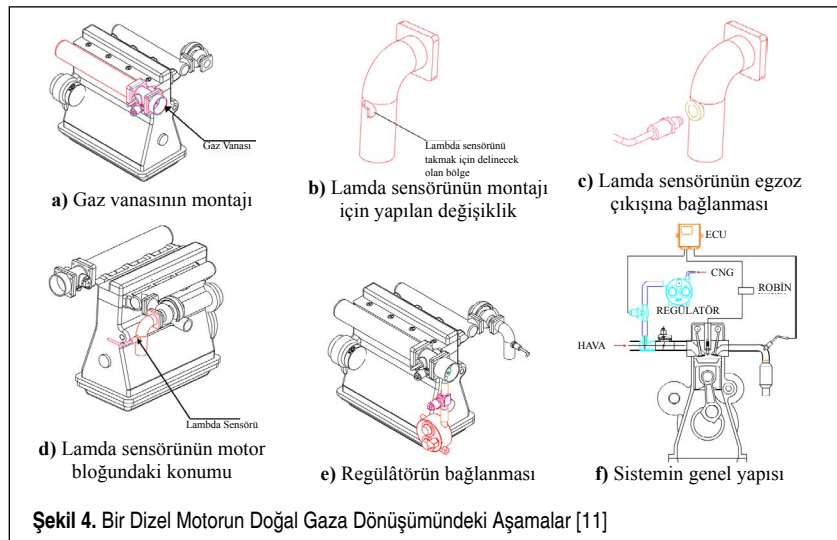
yonlarını kızıl ötesi ölçümlerle; O<sub>2</sub> emisyonlarını ise elektrokimyasal ölçümlerle hassas olarak belirleyebilmektedir.

### 4.2 Yapılan Değişiklikler

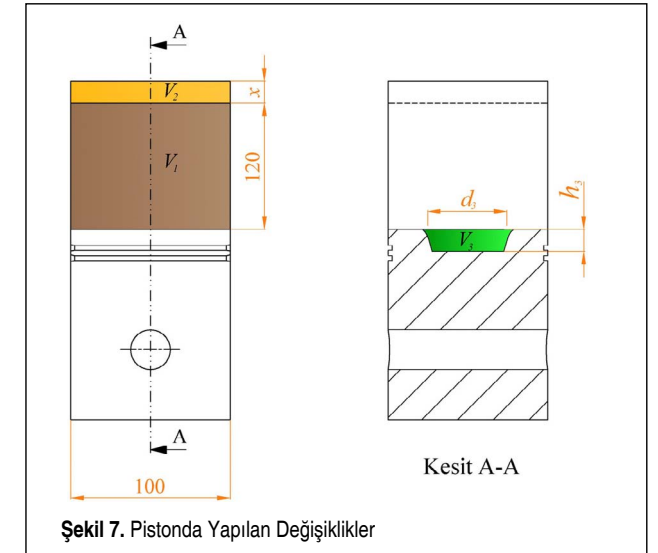
Daha önce de ifade edildiği gibi bir dizel motorunda doğal gazı tek yakıt olarak kullanmanın tek yolu, motorun sıkıştırma oranını değiştirmektir. Bu deneysel çalışmada bu işlem, pistondan belirli bir miktar talaş kaldırılarak yapılmıştır. Sıkıştırma oranı değiştirilen yanma odasında, enjektörlerin yerini bujilerin almasıyla yanma odası dönüşümü tamamlanmış olur. Yanma odasına girecek yakıt-hava karışımı oranının kontrolü ise, sisteme ilave edilen ECU ile



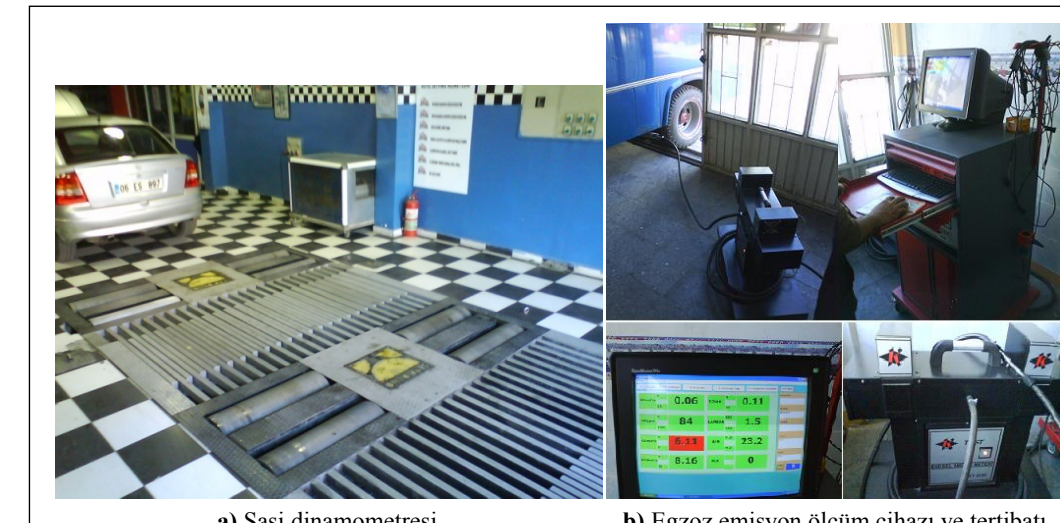
Şekil 3. Bir Dizel Motorun Doğal Gazla Dönüşümünde Pistonlarda Yapılan Değişiklikler [11]



Şekil 4. Bir Dizel Motorun Doğal Gazla Dönüşümündeki Aşamalar [11]



Şekil 7. Pistonda Yapılan Değişiklikler



Şekil 6. Deneylerde Kullanılan Şasi Dinamometresi ve Egzoz Emisyon Ölçüm Tertibatı

sağlanmıştır. Pistonlardan kaldırılacak talaş miktarı, Şekil 7'deki verilerden yararlanılarak hesaplanır.

Bilindiği gibi; sıkıştırma oranı olan  $\epsilon$ , AÖN ve ÜÖN'deki hacimler oranını göstermekte olup aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$\epsilon = \frac{V_1 + V_2}{V_2} \quad (1)$$

Burada;

$$V_1 = \pi r^2 h = \pi(50)^2 (120) \cong 942478 \text{ mm}^3 \quad (2)$$

$$V_2 = \pi r^2 x = \pi(50)^2 x \cong 7854x \text{ mm}^3 \quad (3)$$

şeklinde. Sıkıştırma oranının 17 olması durumu için, yukarıdaki hacim değerleri Denklem 1’de yerlerine yazıldığında;

$$17 = \frac{942478 + 7854x}{7854x} \Rightarrow x \cong 7.5 \text{ mm} \quad (4)$$

bulunur. Böylece;  $V_2 \cong 7854x \cong 58905 \text{ mm}^3$  bulunmuş olur.

Bu durumda, sıkıştırma oranını 17’den 11 değerine düşürmek için Şekil 7’de A - A kesiti ile gösterildiği gibi bir  $V_3$  hacmi oluşturulması gerekir. Oluşturulması gereken bu hacim aşağıdaki gibi hesaplanır.

Dönüşümden sonraki sıkıştırma oranı olan  $\epsilon_d$ , Denklem 5 ile ifade edilir. Böylece,  $V_3$  hacmi bulunabilir. Yani;

$$\epsilon_d = \frac{V_1 + V_2 + V_3}{V_2 + V_3} \quad (5)$$

$$11 = \frac{942478 + 58905 + V_3}{58905 + V_3} \Rightarrow V_3 = 35342.8 \text{ mm}^3 \quad (6)$$

bulunur. Böylece,  $V_3 = 35342.8 \text{ mm}^3$  olarak bulunmuş oldu. Oluşturulan bu silindirik  $V_3$  hacmi Denklem 7’deki gibi formüle edilebilir:

$$V_3 = \pi \left( \frac{d_3}{2} \right)^2 h_3 \quad (7)$$

Eğer,  $d_3 = 50 \text{ mm}$  şeklinde seçilip 7 numaralı denklemde yerine yazılırsa;  $h_3 \cong 18 \text{ mm}$  bulunmuş olur.

Bununla birlikte, dizel motorların teorik ısı veriminin Denklem 8’deki [12] gibi olduğu göz önüne alınırsa, dönüşüm sonucunda sıkıştırma oranının düşürülmüş olmasının, motorun teorik ısı verimini düşüreceği görülür. Zaten yapılan deneyler, bu sonucu doğrulamıştır.

İtalya’daki NGV Motor isimli şirket tarafından yapılan araştırmalarda, CNG’nin alev hızı ve volümetrik veriminin düşük olmasından dolayı, CNG kullanımının motor performansında bir miktar düşüşe neden olduğu saptanmıştır. Bu düşüş, elektronik yakıt enjeksiyonu (EFI) özelliğine sahip motorlarda %13 civarındayken, karbüratörlü motorlarda %20 civarındadır [11].

$$\eta_{td} = 1 - \frac{1}{\epsilon^{k-1}} \left[ \frac{\phi^k - 1}{k(\phi - 1)} \right] \quad (8)$$

Ayrıca, Denklem 8’den görüleceği üzere; dizel motorlarda  $\phi >$

1 ve  $k > 1$  olduğundan, ön genişleme oranı (veya kesme oranı) olan  $\phi$ ’nin artmasının, motorun teorik ısı verimini düşüreceği açıktır.

Çift yakıt ile çalışır hâle dönüştürülmüş bir dizel motorda ise bu teorik ısı verim ifadesi; dönüştürülmüş motorun yine teorik dizel çevrime göre çalıştığı kabulüyle, Denklem 9’daki gibi olur.

$$\eta_{td} = 1 - \frac{1}{\epsilon_d^{k-1}} \left[ \frac{\phi_d^k - 1}{k(\phi_d - 1)} \right] \quad (9)$$

Dönüştürülmüş motorun ön genişleme oranı (veya kesme oranı) olan  $\phi_d$ , Denklem 10’daki gibi tanımlanabilir.

$$\phi_d = \frac{V_3'}{V_2 + V_3} \quad (10)$$

Yine, Denklem 9’dan görüleceği üzere;  $\phi_d > 1$  ve  $k > 1$  olduğundan, dönüştürülmüş motorda da ön genişleme oranı olan  $\phi_d$ ’nin artmasının, dönüştürülmüş motorun teorik ısı verimini düşüreceği açıktır.

#### 4.3 Deneylerde İzlenen Yöntem

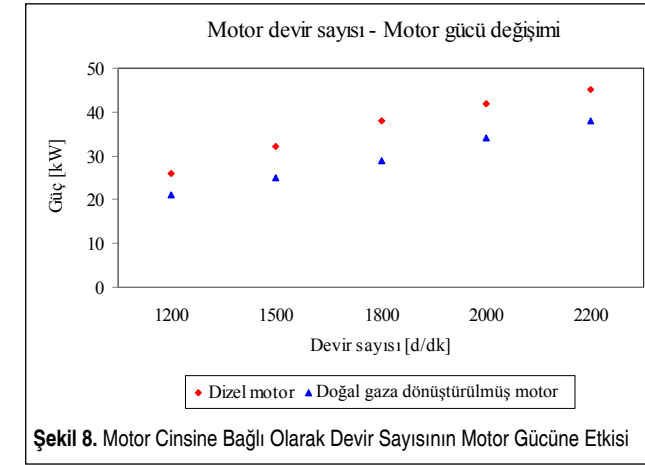
Bu çalışmada her bir ölçüm için, gaz pedali pozisyonlarının değiştirilmesiyle yük artırılarak referans devirlerde ölçümler yapılmıştır. Bu tarz çalışmalarda, motor rejim sıcaklığına ( $\sim 65 \text{ }^\circ\text{C}$ ) ulaşıldıktan sonra ölçümler kaydedilir. Sabit devirlerde gaz pedalıyla tam yüklemeye yapılarak güç okunur. Sırasıyla; 1200 d/dk, 1500 d/dk, 1800 d/dk, 2000 d/dk ve 2200 d/dk’ya sabitlenen deney düzeneğinden güç değerleri elde edilmiştir. Egzoz emisyon ölçümleri ise, motor rölantide çalışırken yapılmıştır.

### 5. DENEYSEL BULGULAR

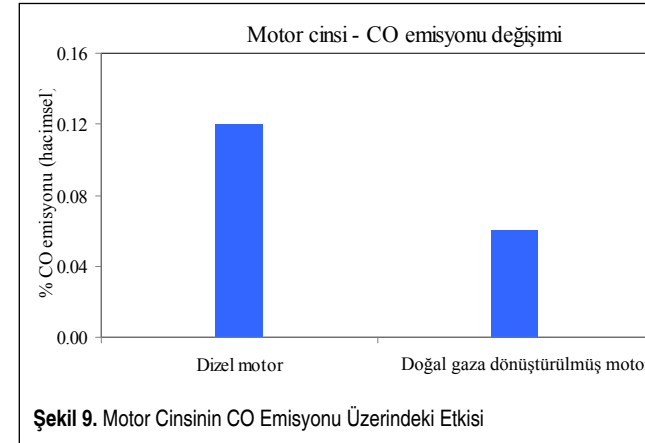
Bu çalışmaya kaynaklık eden Yüksek Lisans Tezi [13] kapsamında; 5 farklı devir sayısında, hem dönüştürmeden önceki dizel motorun hem de dönüştürülmüş motorun gücünün tespiti için deneyler yapılmıştır. Ayrıca; aynı çalışma koşullarında, dönüştürmeden önceki dizel motor ile dönüştürülmüş motorun, CO, CO<sub>2</sub>, HC ve PM emisyon ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Böylece; bir dizel motorun doğal gazlı bir motora dönüştürülmesinin, hem motor gücü hem de egzoz emisyonları üzerindeki etkisi incelenmiştir.

Deneylerden elde edilen verilerden hareketle çeşitli grafikler oluşturulmuştur. Buna göre Şekil 8’de; hem dönüştürmeden önceki dizel motorda hem de dönüştürülmüş motorda, devir sayısının değişiminin motor gücüne etkisi görülmektedir.

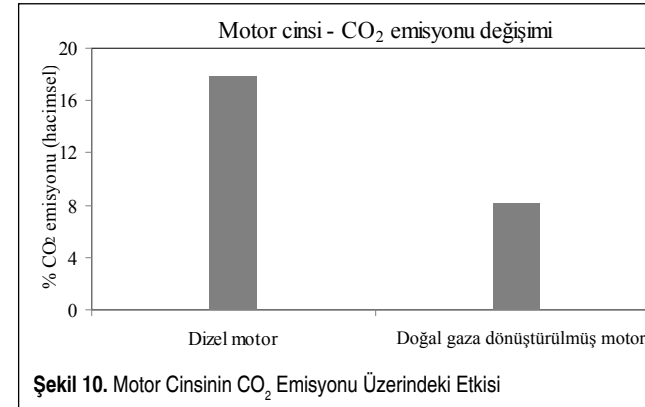
Şekil 9, 10, 11 ve 12’de ise; dönüştürmeden önceki dizel motor ile dönüştürülmüş motorun, sırasıyla CO, CO<sub>2</sub>, HC ve PM emisyonları açısından bir mukayesesi görülmektedir.



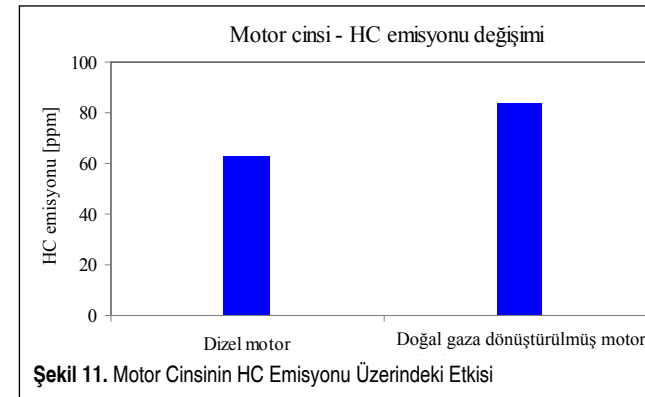
Şekil 8. Motor Cinsine Bağlı Olarak Devir Sayısının Motor Gücüne Etkisi



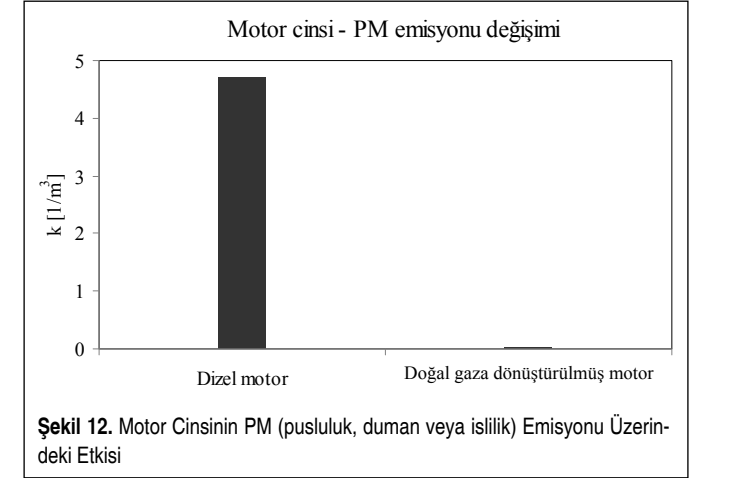
Şekil 9. Motor Cinsinin CO Emisyonu Üzerindeki Etkisi



Şekil 10. Motor Cinsinin CO<sub>2</sub> Emisyonu Üzerindeki Etkisi



Şekil 11. Motor Cinsinin HC Emisyonu Üzerindeki Etkisi



Şekil 12. Motor Cinsinin PM (pusluluk, duman veya isilik) Emisyonu Üzerindeki Etkisi

### 6. SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME

Bu çalışmada; içten yanmalı bir dizel motor, doğal gazla çalışır hâle getirilmiş ve dönüştürülen motorun hem performansına hem de egzoz emisyonuna ilişkin çeşitli deneyler yapılmıştır. Çalışmada ilk olarak; dizel motorların yüksek sıkıştırma oranının doğal gazın yüksek oktan sayısına uyum göstermemesinden dolayı motorun sıkıştırma oranı düşürülmüştür. Sıkıştırma oranının düşürülmesi piston üzerindeki hacmin büyütülmesiyle sağlanmıştır. Bu dönüşüm sonucunda sıkıştırma oranı yaklaşık 17 değerinden 11 değerine düşürülmüştür. Daha sonra, dönüşümü tamamlanan motor deney düzeneğine bağlanmış ve çeşitli ölçümler gerçekleştirilmiştir.

Ölçülen değerlere göre; CNG’ye dönüştürülmüş motorun gücünde bir miktar kayıp olduğu görülmüştür. Bununla birlikte; CO ve CO<sub>2</sub> emisyonlarında büyük oranda bir azalma olduğu tespit edilmiştir. Bir miktar artışın tespit edildiği HC emisyonunun, limit değer olan 1200 ppm’nin altında kalması nedeniyle önemsenmeyecek bir düzeyde olduğu dönüştürülmüş motorda partikül madde miktarı ise sıfıra yaklaşmıştır.

#### 6.1 Motor Gücü Açısından Değerlendirme

Dizelden CNG’ye dönüştürülmüş bir motorun gücünde bir miktar düşüş olduğu bilinmektedir. Fakat bu tip dönüşümlerde, emisyondaki azalma ve ekonomik kazançlar düşünüldüğünde %20’ye kadar olan kayıplar kabul edilebilir sayılmaktadır.

Şekil 8 incelendiğinde; deney motoru dönüştürülmeden önce 1500 d/dk’da 32 kW güç üretmekte iken, dönüşüm yapıldıktan sonra aynı devir sayısı için bu değer 25 kW’a düşmüştür. Bu devir sayısı için bu düşüş, motor gücünde yaklaşık %22’lik bir düşüş demektir ve kabul edilebilir sınırlar içerisinde. Aynı şekilde dönüşümden önce 2000 d/dk’da 42 kW olan güç, 34 kW’a inmiştir. Bu da yaklaşık %19’luk bir düşüş anlamına gelmektedir. Grafikteki diğer veriler de incelendiğinde; motor gücündeki azalmaların yaklaşık %15.56 ile %23.68 arasında

değiştirdiği görülebilir. Deneylerde kullanılan karbüratörlü motorun gücündeki bu azalmalar, kaynaklarda [11] verilen %20 düşüş oranıyla da uyumludur.

### 6.2 Emisyon Açısından Değerlendirme

Şekil 9 incelendiğinde; dönüşümden önce motorun CO emisyonu hacimsel olarak %0.12 iken dönüşümden sonra %50 azalarak %0.06 değerine düştüğü görülmektedir. CNG dönüşümüyle sağlanan bu emisyon azalması, kilometre başına yaklaşık 0.35 g emisyonu karşılık gelmektedir. Şehir içinde taşımacılık yapan ticari bir aracın günde en az 100 km yol kat ettiği düşünülerek, CNG'ye dönüşümle araç başına günde 35 g civarında bir CO emisyon azalması sağlanabileceği düşünülmektedir. Bu değer aylık olarak düşünüldüğünde araç başına 1 kg, yıllık olarak da 12 kg emisyon azalması anlamına gelecektir. Bu dönüşümün herhangi bir büyükşehirde 1000 araç tarafından uygulanması, CO emisyonunda yıllık olarak yaklaşık 12 tonluk bir azalmaya tekabül edecektir.

CO<sub>2</sub> emisyonuna bakıldığında ise bu kazancın, CO emisyonuna göre daha yüksek olduğu görülmektedir. Şekil 10 incelendiğinde; dönüşümden önce motorun CO<sub>2</sub> emisyonu hacimsel olarak %17.8 iken dönüşümden sonra yaklaşık %53.93 azalarak %8.2 değerine düşmüş olduğu görülmektedir. CNG'ye dönüşümle temin edilen bu emisyon azalması, kilometre başına 150 g'dan daha fazla emisyon kontrolü demektir. Yukarıda yapılan değerlendirmeler CO<sub>2</sub> emisyonu için de uygulanırsa, günlük olarak 15 kg, aylık olarak ise 450 kg değerinde bir kazanım mümkün olacaktır. Bu da araç başına senelik 5400 kg emisyon kazancı anlamına gelmektedir. Yine, 1000 araçlık bir CNG dönüşümü sonunda ise bu kazanç 5400 ton olacaktır.

Şekil 11 incelendiğinde; dönüşümden önce motorun HC emisyonu 63 ppm iken dönüşümden sonra yaklaşık %33.33 artarak 84 ppm değerine yükseldiği görülmektedir. CNG'ye dönüşümden sonra HC emisyonundaki bu artış; ulaşılan değer, limit değer olan 1200 ppm'nin yine de çok altında olması nedeniyle önemsenmeyecek bir artış olarak değerlendirilebilir.

Doğal gaz dönüşümünün en önemli etkisi PM emisyonunda görülmektedir. Deneysel çalışmaya konu olan motor, dönüşümden önce bakanlık tarafından konulan limitlerin yaklaşık 2 katı kadar bir emisyon üretmekteyken, dönüşümden sonra PM emisyonu 0 seviyesine yaklaşmıştır. Şekil 12 incelendiğinde; dönüşümden önce motorun k değeri 4.7 1/m<sup>3</sup> iken dönüşümden sonra yaklaşık %99.36 azalarak 0.03 değerine düşmüş olduğu görülmektedir. Partikül madde insan sağlığı açısından en tehlikeli emisyon ürünüdür. PM, oksitlenmemiş karbon moleküllerinin bir araya toplanmasıyla oluşur ve ciğerlere yapışarak kanserojen etki gösterir. PM emisyonunun sifira yaklaşması bile, bu dönüşümün başlı başına ne kadar önemli olduğunun bir göstergesidir.

### 6.3 Ekonomik Açından Değerlendirme

Ocak 2013 itibarıyla dizel yakıtının (motorinin) fiyatı 4.16 ₺/lt [14], CNG'nin fiyatı ise 2.37 ₺/m<sup>3</sup> [8] civarındadır. 100 kilometrede ortalama 10 lt dizel yakıt tüketen bir araç, doğal gaz dönüşürüldüğünde yine 100 kilometrede ortalama 11 m<sup>3</sup> CNG tüketmektedir [8]. Bu da günde 100 km yol kat eden bir araç için günlük; (4.16)(10) - (2.37)(11)=15.53 ₺ veya %37.33 kazanç anlamına gelmektedir. Yani böyle bir aracın doğal gaz dönüşümü, araç başına aylık yaklaşık 466 ₺, yıllık da 5591 ₺ kazanç sağlayacaktır.

Yukarıdaki ekonomik değerlendirmeye, söz konusu motorun CNG'ye dönüşüm maliyetinin de eklenmesi gerekir. Buna göre; CNG tankı, elektronik kontrol ünitesi, regülâtör, gaz vanası, lamda sensörü, bujiler, bakır boru, pistonların genişletilmesi ve iççilik gibi bileşenlerin maliyetlerinden müteşkil dönüşüm maliyeti, yapılan güncel bir piyasa araştırmasıyla yaklaşık olarak 2500 ₺ olarak belirlenmiştir. Bu durumda; yukarıdaki şartlarda çalışan söz konusu motor, ilk altı aylık dönemde dönüşüm maliyetini, diğer bir ifadeyle, amortisman süresini karşılamış olacaktır. Geriye kalan sürelerdeki kazanç, net kazanç olarak değerlendirilebilir.

Yapılan bu deneysel çalışmayla; gerekli yatırımlar yapıldığında, emisyon açısından çevreye büyük zararları olan, özellikle eski tip dizel taşıtların doğal gaz dönüşümünün, uzun vadede hem ekolojik hem de ekonomik açıdan büyük faydalar sağlayacağı sonucuna ulaşılmıştır. Gerekli desteğin sağlanması ve sıkıştırılmış doğal gaz (CNG) dolum istasyonlarının sayısının artırılmasıyla araçlarda doğal gaz kullanımının önümüzdeki yıllarda yaygınlaşacağı düşünülmektedir. Bu durum; hem kısmen bir doğal gaz üreticisi olan ülkemizin petrol alanındaki dışa bağımlılığını azaltacak hem de yeni nesillere daha temiz bir çevre bırakmamızı sağlayacaktır.

## SEMBOLLER

$d_3$	: Pistonda oluşturulan silindirik hacmin çapı (mm)
$h_3$	: Pistonda oluşturulan silindirik hacmin yüksekliği (mm)
$k$	: Özgül ısılar oranı ( $c_p/c_v$ )
$V_1$	: Piston alt ölü noktada iken yanma odası hacmi (mm <sup>3</sup> )
$V_2$	: Piston üst ölü noktada iken yanma odası hacmi (mm <sup>3</sup> )
$V_3$	: Dönüşüm için pistonun üst kısmında oluşturulan hacim (mm <sup>3</sup> )
$V_3'$	: Dönüştürülmüş motorda yanma işlemi sonundaki hacim (mm <sup>3</sup> )

### Kısaltmalar

AB	: Avrupa Birliği
AÖN	: Alt Ölü Nokta

CD	: Konvansiyonel dizel (Conventional Diesel)
CNG	: Sıkıştırılmış doğal gaz (Compressed Natural Gas)
CPG	: Sıkıştırılmış petrol gazı (Compressed Petroleum Gas)
ECD	: Emisyon kontrollü dizel (Emission Controlled Diesel)
ECM	: Elektronik kontrol modülü (Electronic Control Module)
ECU	: Elektronik kontrol ünitesi (Electronic Control Unit)
EFI	: Elektronik yakıt enjeksiyonu (Electronic Fuel Injection)
EO	: Eşdeğerlik Oranı (Ekivalans oranı)
EPA	: Çevre koruma ajansı (Environment Protection Agency)
HFK	: Hava Fazlalık Katsayısı
IEA	: Uluslararası enerji ajansı (International Energy Agency)
İYM	: İçten yanmalı motor
LNG	: Sıvılaştırılmış doğal gaz (Liquefied Natural Gas)
LPG	: Sıvılaştırılmış petrol gazı (Liquefied Petroleum Gas)
MOS	: Motor Oktan Sayısı
NGV	: Doğal gazlı araçlar (Natural Gas Vehicle)
OAPEC	: Petrol ihraç eden Arap ülkeleri örgütü (Organization of Arab Petroleum Exporting Countries)
OPEC	: Petrol ihraç eden ülkeler örgütü (Organization of Petroleum Exporting Countries)
PM	: Partikül Madde (pusluluk, duman veya islilik)
ROS	: Araştırma Oktan Sayısı
ÜÖN	: Üst Ölü Nokta

### Yunan harfleri

$\epsilon$	: Sıkıştırma oranı $[(V_1+V_2)/V_2]$
$\epsilon_d$	: Dönüştürülmüş motorun sıkıştırma oranı $[(V_1+V_2+V_3)/(V_2+V_3)]$
$\phi$	: Ön genişleme oranı (yanma işleminden sonraki ve önceki hacimlerin oranı)
$\phi_d$	: Dönüştürülmüş motorun ön genişleme oranı $[V_3'/(V_2+V_3)]$
$\eta_{td}$	: İçten yanmalı bir dizel motorun teorik ısı verimi (%)
$\lambda$	: Hava fazlalık katsayısı $[(m_h)_{gercek}/(m_h)_{teorik}]$ veya $[(m_h)_{gercek}/m_y]/[(m_h)_{teorik}/m_y]$
$\psi$	: Eşdeğerlik oranı $[\psi = 1/\lambda]$ veya $[(m_h)_{teorik}/(m_h)_{gercek}]$ veya $[(m_h)_{teorik}/m_y]/[(m_h)_{gercek}/m_y]$

### İndisler

d	: dizel, dönüştürülmüş motor
h	: hava
t	: teorik
y	: yakıt

## TEŞEKKÜR

Bu çalışmaya kaynaklık eden Yüksek Lisans Tezinin deneylerinin yapılmasındaki destekleri nedeniyle Sayın Ufuk TAŞ-KESEN Bey'e teşekkür ederiz.

## KAYNAKÇA

1. **Alptekin, E., Çanakçı, M.** 2006. "Biyodizel ve Türkiye'deki Durumu," Mühendis ve Makina Dergisi, cilt: 47, sayı: 561, s. 57-64.
2. **Öztürk, G.** 1989. "Egzoz Gazlarından Kurtuluşa Doğru," (New Scientist'ten Çeviren: Gürkan Öztürk), Bilim ve Teknik Dergisi, cilt: 22, sayı: 263, s. 30-33, Ekim 1989.
3. Türkiye Petrolleri A.O. Genel Müdürlüğü. 2012. "2011 Yılı Hampetrol ve Doğal Gaz Sektör Raporu."
4. **Goyal, P., Sidhartha.** 2003. "Present Scenario of air Quality in Delhi: a Case Study of CNG Implementation," Atmospheric Environment, vol. 37, p. 5423-5431.
5. **Poompipatpong, C., Cheenkachorn, K.** 2011. "A Modified Diesel Engine for Natural Gas Operation: Performance and Emission Tests," Energy, vol. 36, p. 6862-6866.
6. **Cohen, J. T.** 2005. "Diesel vs. Compressed Natural Gas for School Buses: a Cost-Effectiveness Evaluation of Alternative Fuels," Energy Policy, vol. 33, p. 1709-1722.
7. **Dönmez, D., Semercioğlu, H., Cömert, Ö. M., Üzmez, G.** 2009. "Dizel Motor ile Çalışan Belediye Otobüslerinin İncelenmesi ve Emisyon Envanterlenmesi," Bitirme Tezi, Danışman: Doç. Dr. Şeref Soylu, Sakarya Üniversitesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, Sakarya.
8. <http://www.naturelgaz.com> son erişim tarihi: 15.01.2013
9. <http://www.iangv.org/current-ngv-stats/> son erişim tarihi: 23.01.2013
10. **Çetinkaya, S.** 2004. "Benzin ve Dizel Motorların Doğal Gaz Motoruna Dönüştürülmesi," Tesiat Mühendisliği Dergisi, sayı: 81, s. 14-31.
11. [http://www.ngvmotori.it/UK\\_HTML/p\\_dedicated.htm#](http://www.ngvmotori.it/UK_HTML/p_dedicated.htm#), son erişim tarihi: 15.01.2013
12. **Binark, A. K.** 2004. "Termodinamik II Ders Notları," Marmara Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi, İstanbul.
13. **Sezgin, B.** 2009. "Bir Dizel Motorun Doğalgaz ile Çalışır Hâle Getirilmesi ve Analizi," Yüksek Lisans Tezi, Danışman: Prof. Dr. Veli Çelik, KÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Ekim 2009, Kırıkkale.
14. <https://ppbp.epdk.org.tr/Rapor/Akaryakit/Paylasim/Rapor-SekizFirma.aspx> son erişim tarihi: 23.01.2013