

## The Investigation of the Effects of Using Natural Gas on the Performance and Exhaust Emissions in an HCCI-DI Engine

Oğuz Kürşat DEMİRCİ<sup>1</sup>, Can ÇINAR<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı, 06374, Yenimahalle/ANKARA

<sup>2</sup>Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Otomotiv Mühendisliği Bölümü, 06500, Yenimahalle/ANKARA

### Graphical/Tabular Abstract

In this study, the effects of compressed natural gas (CNG) charge on the engine performance and exhaust emissions were investigated in a four-stroke, single-cylinder, HCCI-DI diesel engine. The tests of the engine were conducted at the maximum torque speed of 2200 rpm under full load (16 Nm) operating conditions.

### Article Info:

Received: 04/02/2019

Revision 27/03/2019

Accepted: 03/04/2019

### Highlights

- Premixed CNG fuel was delivered to the intake manifold.
- Performance and emission characteristics were investigated.
- SFC and thermal efficiency improved, CO and soot emissions decreased.

### Keywords

HCCI-DI Engine  
 Compressed Natural Gas  
 Performance  
 Exhaust Emissions

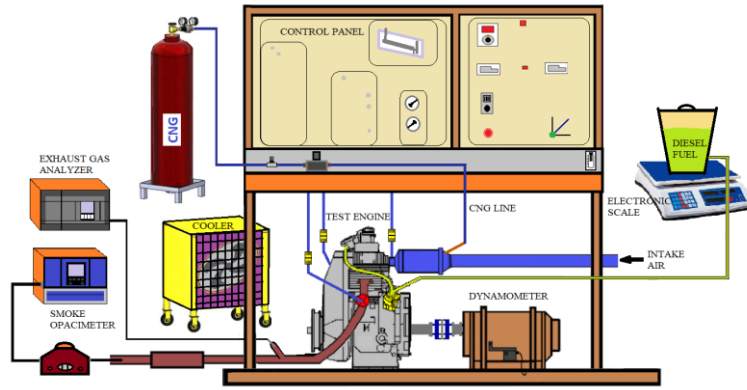


Figure A. Schematic view of the experimental setup

**Purpose:** In this study, the use of compressed natural gas in a DI diesel engine was investigated. For this purpose, premixed CNG fuel was delivered to the designed intake manifold using a pressure reducer and a sensitive gas flow meter. Performance and emission characteristics of the engine were investigated.

**Theory and Methods:** Experiments were conducted at full load and 2200 rpm engine speed. Premixed CNG fuel was delivered to the intake manifold using a pressure reducer and a sensitive gas flow meter. In the experiments, the maximum torque that the engine gives under standard diesel fuel operation was decreased between 0 - 90 % at an interval of 10% and the same torque value was obtained with CNG fuel delivered to the intake manifold.

**Results:** Experimental results showed that, specific fuel consumption, CO and soot emissions decreased and thermal efficiency increased at 90% torque change rate with M10C90 fuel compared to pure diesel fuel (M100) operation.

**Conclusion:** In the present study, the effects of premixed CNG fuel on the performance and exhaust emissions were investigated in a four-stroke, single cylinder, HCCI-DI engine. In the engine tests, specific fuel consumption, thermal efficiency, carbon monoxide (CO), hydrocarbon (HC), nitrogen oxide (NOx) and soot emissions were investigated with torque variation ratio from 0 – 90%. Specific fuel consumption, CO and soot emissions decreased by 17.19%, 93.67% and 97.95%, respectively, at 90% torque change rate with M10C90 compared to pure diesel fuel (M100) experiments. In addition to this, thermal efficiency increased by 10.02%, HC and NOx emissions increased by 50% and 186%.



## HCCI-DI Bir Motorda Doğal Gaz Kullanımının Performans ve Egzoz Emisyonlarına Etkisinin İncelenmesi

Oğuz Kürşat DEMİRCİ<sup>1</sup>, Can ÇINAR<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı, 06374, Yenimahalle/ANKARA

<sup>2</sup>Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Otomotiv Mühendisliği Bölümü, 06500, Yenimahalle/ANKARA

### Öz

Bu çalışmada tek silindirli, dört zamanlı, HCCI-DI dönüşümü yapılmış bir dizel motorunda, ön karışimli sıkıştırılmış doğal gaz (CNG) kullanımının performans ve egzoz emisyonlarına etkileri incelenmiştir. Motorun maksimum moment devri olan 2200 d/d'da, tam yük (16 Nm) çalışma koşullarında yapılan deneylerde, ön karışimli CNG yakıtı basınç düşürücü ve hassas gaz akış ölçeri kullanılarak tasarlanan emme manifolduna verilmiştir. Deneylerde motorun standart dizel çalışma koşullarında verdiği moment % 0 – 90 aralığında % 10 aralıklarla azaltılarak, aynı moment değeri emme manifolduna verilen CNG yakıtı ile tamamlanmıştır. % 0 – 90 tork değişim oranında yapılan deneylerde, özgül yakıt tüketimi, termik verim, karbonmonoksit (CO), hidrokarbon (HC), azotoksit (NOx) ve is emisyonlarının değişimleri incelenmiştir. Saf motorin yakıtı (M100) ile yapılan deneylere kıyasla % 90 tork değişim oranında (M10C90) özgül yakıt tüketimi %17,19, CO %93,67 ve is %97,95 oranında azalmıştır. Bununla birlikte termik verim % 10,02, HC %50 ve NOx %186 oranında artış göstermiştir.

### Makale Bilgisi

Başvuru: 04/02/2019

Düzeltilme: 27/03/2019

Kabul: 03/04/2019

### Anahtar Kelimeler

HCCI-DI Motor  
Sıkıştırılmış Doğal Gaz  
Performans  
Egzoz Emisyonları

### The Investigation of the Effects of Using Natural Gas on the Performance and Exhaust Emissions in an HCCI-DI Engine

### Keywords

HCCI-DI Engine  
Compressed Natural Gas  
Performance  
Exhaust Emissions

### Abstract

In this study, the effects of compressed natural gas (CNG) charge on the engine performance and exhaust emissions were investigated in a single-cylinder, four stroke, HCCI-DI diesel engine. The experiments were conducted at the maximum torque speed of 2200 rpm under full load (16 Nm) operating conditions. Premixed CNG fuel was delivered to the designed intake manifold using a pressure reducer and sensitive gas flow meter. In the experiments, the maximum torque that the engine gives under standard diesel fuel operation was decreased between 0 - 90 % at an interval of 10% and the same torque value was obtained with CNG fuel delivered to the intake manifold. In the experiments, specific fuel consumption, thermal efficiency, carbon monoxide (CO), hydrocarbon (HC), nitrogen oxide (NOx) and soot emissions were investigated with torque variation ratio from 0 – 90%. Specific fuel consumption, CO and soot emissions decreased by 17.19%, 93.67% and 97.95%, respectively, at 90% torque change rate with M10C90 compared to pure diesel fuel (M100) experiments. In addition to this, thermal efficiency increased by 10.02%, HC and NOx emissions increased by 50% and 186%.

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Son yıllarda hükümetlerin sıkılaştıran emisyon düzenlemeleri ve çevresel sorunlar içten yanmalı motorlarda kullanılabilir daha çevreci ve alternatif yakıt arayışlarına hız kazandırmıştır [1,2]. Bu alternatif yakıtlar içerisinde doğal gaz geniş kaynakları, düşük maliyeti ve kolay erişilebilirliği ile ön plana çıkmaktadır [1]. Günümüzde doğal gaz, hem buji ile ateşlemeli hem de dizel motorlarda alternatif bir yakıt olarak kullanılabilir [3,4]. Doğal gaz yüksek oktan sayısı sebebiyle kendi kendine tutuşması zor olan bir yakıt türüdür. Bu nedenle dizel motorlarda yapılan çalışmalarda büyük oranda çift yakıtlı olarak kullanım sağlanmaktadır [1,3,5-10]. Otomotiv endüstrisinde üretici firmalar tarafından araç menzili uzatmak, yakıt maliyetlerini azaltmak ve daha düşük kirletici emisyon değerleri elde etmek için, sıvı+gaz veya sadece gaz yakıtlarıyla çalışan motorlu araçlar üretilmiş ve sürücülerin hizmetine sunulmuştur (Audi, Fiat, Mercedes,

Opel, Seat, Skoda, Volkswagen, Temsa, Honda, Iveco, Man, Renault, Scania, Solaris vs.) [11]. Özellikle Almanya'da yoğunlaşacağı bildirilen “doğal gaz yakıtlı motor” çalışmalarının hedefi, 2025 yılına kadar Almanya'da CNG kullanan araç sayısını 1 milyona çıkarmak olarak bildirilmiş ve bu artış için aynı aralıkta CNG yakıt istasyonu sayısının da 900'den 2000'e çıkarılması hedeflenmiştir. Benzin ve dizel yakıtlarına oranla daha çevreci olan CNG yakıtı, yeni geliştirilen elde etme ve dağıtım teknikleri sayesinde kullanım alanını artırmayı başarmıştır. Elektrikli araçların menzil ve popülerlik anlamında yükselişe geçmesine rağmen, ağır vasıta ve otobüs gibi daha fazla güç, tork ve uzun menzil isteyen araçlarda CNG yakıtlı motorlar iyi bir alternatif olarak öne çıkabilir [12-14].

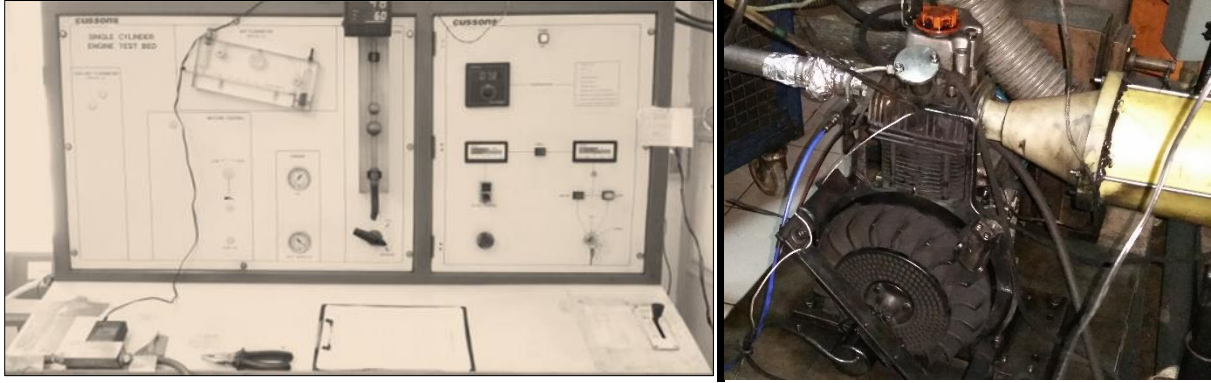
Homojen dolgulu sıkıştırma ile ateşlemeli (HCCI) motorlar, buji ile ateşlemeli ve dizel motorların ortak avantajlarını barındırmakta olup, yüksek ısı verim ve düşük egzoz emisyonlarını aynı anda sağlayabilecek potansiyele sahip alternatif bir yanma teknolojisidir. Bu yanma modunda silindir içerisinde ya da emme portunda homojen olarak hazırlanan dolgu, herhangi bir kısılmaya maruz kalmadan doğrudan silindir içerisine alınmaktadır. Ön karışımli homojen dolgunun sıkıştırılması sonrası birçok bölgede eş zamanlı olarak gerçekleşen yanma, yanma odası içerisindeki yüksek sıcaklık bölgelerini ortadan kaldırarak, is partiküllerinin oluşumunu önlemektedir [15-17]. Christensen ve arkadaşları [18], düşük setan sayılı ve yüksek uçuculuğa sahip yakıtları (izo-oktan, etanol ve doğal gaz), 17/1 ve daha yüksek sıkıştırma oranlarında HCCI bir motorda test etmişler ve konvansiyonel dizel motorundan elde edilen değerlere yakın termik verim değerleri elde etmişlerdir. 21/1 sıkıştırma oranında ve HCCI yanma şartlarında yakıt olarak izo-oktan kullanıldığında ön ısıtmaya gerek olmadığını, etanol ve doğal gaz kullanımında ise sırasıyla 80 °C ve 120 °C'lik ön ısıtma yapılması gerekli olduğunu tespit etmişlerdir. Hariruddin ve arkadaşları [19] motorin ile çalışan HCCI bir motorda hidrojen ve doğal gaz yakıtlarının kullanımını araştırmışlardır. Bu çalışmada HCCI motorların yeni bir yanma teknolojisi kullandığı bildirilmiş ve yanmayı başlatacak buji veya enjektörlerin olmadığı, yakıtın silindir içerisinde kimyasal olarak aktivasyon enerjisine ulaştıktan sonra kendiliğinden silindir içerisinde birçok noktada tutuşarak yandığı bildirilmiştir. HCCI motorlarının geliştirilmesi gereken başlıca sorunlar olarak; karışımın kendiliğinden kontrolsüz tutuşması, ısı yayılım oranının yüksek yüklerdeki kontrolünün zorluğu, soğuk çalışan motorda emisyon standartlarının sağlanması ve vuruntu kontrolünün zorlukları olarak bildirilmiştir. Düşük motor devirlerinde gerçekleşen kendi kendine erken tutuşma vuruntuya sebep olurken, yüksek motor devirlerinde geç tutuşma problemi ortaya çıkmaktadır. Bu nedenle HCCI yanma modunda ateşleme zamanı kontrolü büyük önem taşımaktadır. HCCI yanma modunda hidrojen yakıtı ile yapılan deneylerde azalan güç ile birlikte emisyon değerlerinin de büyük ölçüde azaldığı görülmüştür. Ayrıca, çift yakıt ile yapılan deneylerde hidrojen yakıtı motorin ile birleştirildiğinde düşük CO, NOx ve partikül madde emisyonlarının elde edildiği bildirilmiş ve motor gücünün ise %13 - 16 oranında artırılabilirdiği görülmüştür.

Bu çalışmada, içten yanmalı motorlarda gelecek vaat eden CNG yakıtının sıkıştırma ile ateşlemeli bir motorda HCCI-DI dönüşümü yapılarak kullanılabilirliği araştırılmıştır. HCCI-DI dönüşümü yapılan motorda yapılan deneylerde, doğal gaz kullanımı sonucu egzoz emisyonlarının azaldığı ve yakıt ekonomisi sağlandığı görülmüştür. Bu çalışmanın özellikle son yıllarda otobüs ve ağır vasıta kullanıcıları tarafından tercih edilen CNG yakıtının kullanımından kaynaklanan bazı sorunlara çözüm yolu açması amaçlanmaktadır.

## 2. MATERYAL VE METOD (MATERIAL AND METHOD)

Deneyisel çalışma Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Otomotiv Mühendisliği Bölümü, İçten Yanmalı Motorlar Laboratuvarı'nda yapılmıştır. Deney düzeneği ve deney motoru Resim 1'de verilmiştir.

Deneyler; HCCI-DI dönüşümü yapılmış sıkıştırma ile ateşlemeli, dört zamanlı, direkt enjeksiyonlu ve tek silindirli Antor 6LD 400 marka bir motor ile yapılmıştır. Deneylerde yakıt olarak motorin ve CNG yakıtları kullanılmıştır. Deneylerde kullanılan motorun teknik özellikleri Tablo 1'de, motorin ve CNG yakıtlarının özellikleri ise Tablo 2'de verilmiştir.



**Resim 1.** Deney düzeneği ve HCCI-DI motorun görünümü

**Tablo 1.** Deneylerde kullanılan motorun teknik özellikleri [20]

Markası	Antor 6LD 400	Maksimum motor devri [d/d]	3600
Motor tipi	Sıkıştırma ile ateşlemeli, 4 zamanlı	Maksimum motor gücü [kW]	5,4 kW (3000 d/d)
Enjeksiyon tipi	Direkt enjeksiyon	Maksimum moment [Nm]	19,6 Nm (2200 d/d)
Silindir sayısı	1	Enjeksiyon basıncı [bar]	180
Silindir çapı [mm]	86	Enjeksiyon zamanı [önce ÜÖN]	24°
Kurs boyu [mm]	68	Enjektör delik sayısı ve çapı [mm]	4x0,24
Silindir hacmi [cm <sup>3</sup> ]	395	Enjektör uç açısı	160°
Sıkıştırma oranı	18:1	Yanma odası geometrisi	Meksika Şapkası

**Tablo 2.** Deneylerde kullanılan motorin ve CNG yakıtlarının temel özellikleri [21]

	Motorin	CNG
Kimyasal Formül	C <sub>4</sub> -C <sub>12</sub>	CH <sub>4</sub>
Setan Sayısı	40-50	-
Oktan Sayısı	-	>120
Kendiliğinden Tutuşma Sıcaklığı [K]	483	853
Stokiyometrik Hava/Yakıt Oranı	14,7	17,2
Alt Isıl Değer [MJ/kg]	42,5	47,14

Deneyler, Resim 1’de görülen Cussons P8160 marka tek silindireli motor test düzeneğinde yapılmıştır. Deney tertibatında bulunan D.C. elektrikli dinamometre, 4000 d/d devirde 10 kW güç absorbe edebilmektedir. Egzoz emisyonlarının ölçümünde teknik özellikleri Tablo 3’te verilen Bosch BEA350 marka egzoz gaz analizörü kullanılmıştır. Bu cihaz CO, HC, NO, O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> gazlarını ve λ (lambda) değerini ölçmektedir. Is emisyonlarının ölçümünde ise AVL marka DiSmoke serisi kısmi akışlı opazimetre kullanılmıştır. Opazimetrenin teknik özellikleri de Tablo 3’te görülmektedir.

Deneylerde kullanılan CNG yakıtı 200 bar basınçta sıkıştırılmış, 12,5 m<sup>3</sup> hacmindeki, 50 litrelik çelik gaz tüpü içerisinde depolanmış ve bu tüpten basıncı düşürülerek gaz yakıt hattına sevk edilmiştir. Deneylerde Kasweld marka gaz basınç düşürücüsü kullanılmıştır. Basınç düşürücüsü sabit basınca ayarlandığı için aynı



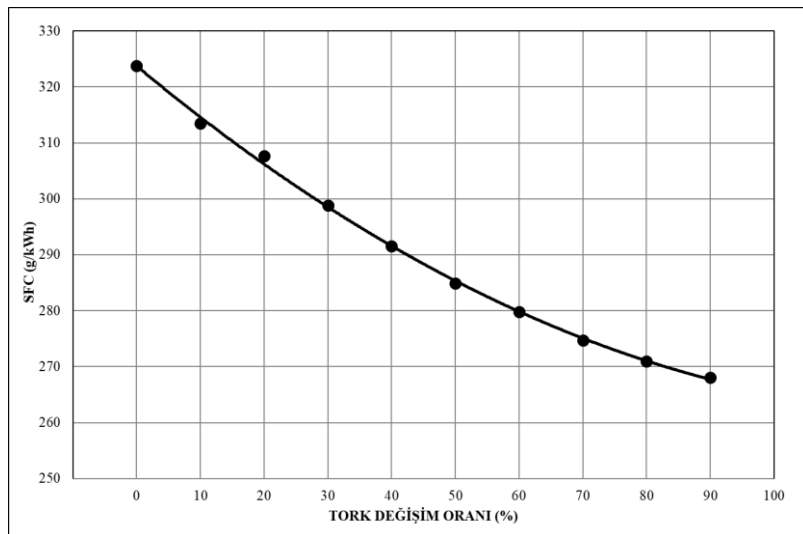
**Tablo 5.** Ölçümlerin doğruluğu ve hesaplanan sonuçlardaki belirsizlikler.

	Doğruluk	Belirsizlik
Moment [Nm]	-	± %0,25
Yakıt Debisi [g/dk]	-	± %0,54
Özgül Yakıt Tüketimi (Motorin Yakıtı İçin) [g/kWh]	-	± %1,12
Özgül Yakıt Tüketimi (Motorin+CNG Yakıtı İçin) [g/kWh]	-	± %1,38
Termik Verim [%]	-	± %0,96
HC [ppm]	1	± %1,2
CO [% hacim]	0,001	± %1,6
NO <sub>x</sub> [ppm]	≤ 1	± %2,3
İs [%]	0,1	± %1,9
Motor Yüğü [N]	± %0,1	-
Motor Devri [d/d]	± 3 [d/d]	-
Yakıt Tüketimi [g]	± %0,2	-
Sıcaklık [°C]	± 1 [°C]	-
Zaman [s]	± 1 [s]	-

### 3. DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ (EVALUATION OF THE EXPERIMENTAL RESULTS)

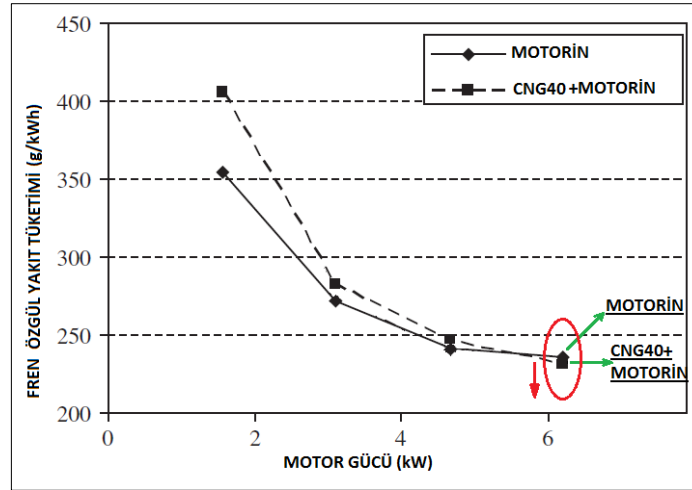
#### 3.1. Özgül Yakıt Tüketimi

Şekil 1’de tork değişim oranına bağlı olarak özgül yakıt tüketimi değişimi görülmektedir. 2200 d/d motor devri ve 16 Nm tam yükte gerçekleştirilen deneylerde CNG artışına bağlı olarak özgül yakıt tüketiminin azaldığı görülmektedir. Motorin yakıtı ile standart dizel çalışma koşullarında (M100) yapılan deneylerde özgül yakıt tüketimi 323,75 g/kWh olarak elde edilirken, %50 tork değişim oranında (M50C50) %11,99 azalarak 284,93 g/kWh, %90 tork değişim oranında ise (M10C90) %17,19 azalarak 268,08 g/kWh olarak elde edilmiştir. Tork değişim oranı arttıkça silindir içerisine giren doğal gaz yakıtı miktarı da artmaktadır.



**Şekil 1.** Tork değişim oranına bağlı olarak özgül yakıt tüketimi değişimi

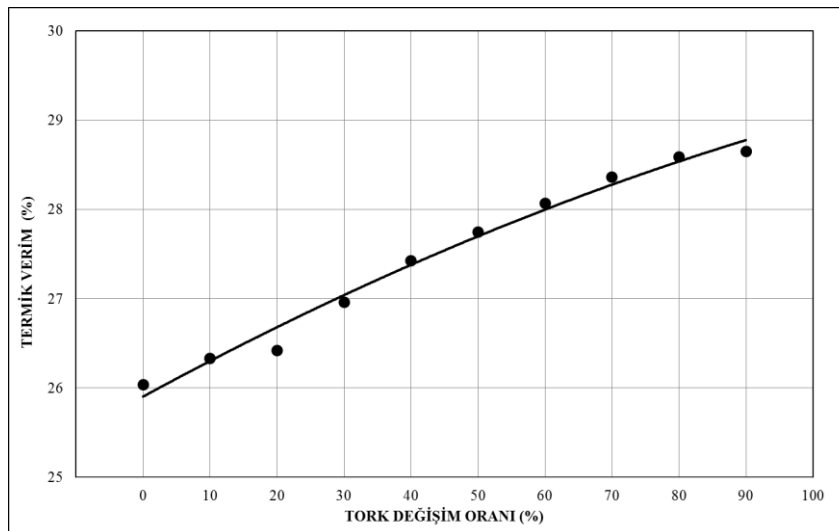
Doğal gaz yakıtının alt ısı değerinin motorine göre yüksek oluşu, tork değişim oranı arttıkça silindir içi sıcaklıkların ve silindir içi basıncın da yüksek oluşuna sebep olmuştur. Artan silindir içi sıcaklıklar yanma süresini ve tutuşma gecikmesini azaltmıştır. Bu etkiler neticesinde doğalgazın silindir içerisinde tork değişim oranıyla birlikte artan miktarı, yanma oluşumunu iyileştirmiş ve özgül yakıt tüketiminin motorin kullanımına göre azalmasına neden olmuştur [24]. Şekil 2’de grafiği görülen Karabektaş ve arkadaşları [24] tarafından tek silindirli bir dizel motorunda tam yükte motorin ve doğal gaz yakıtlarıyla yapılan deneylerde elde edilen özgül yakıt tüketimi değeri yalnız motorin ile elde edilen özgül yakıt tüketimi değerlerinin altında çıkararak benzer sonuçlar elde edilmiştir.



Şekil 2. Motorin ve CNG40+motorin yakıtının motor gücüne bağlı olarak özgül yakıt tüketimi değişimi [24]

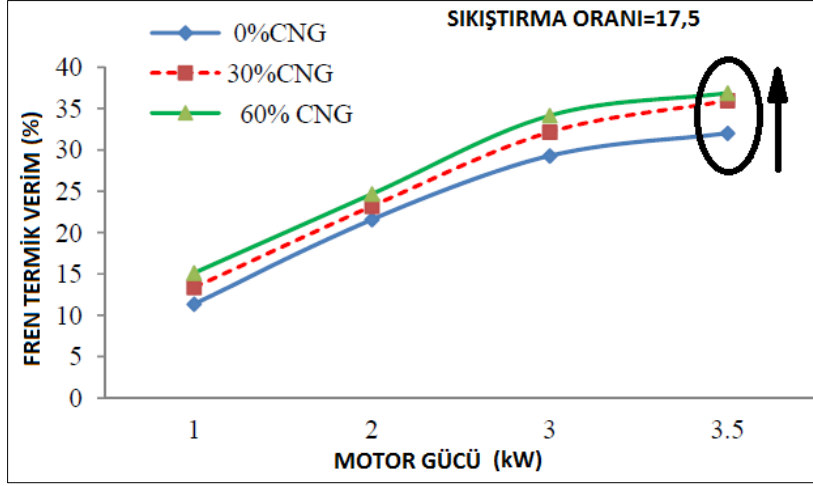
### 3.2. Termik Verim

Şekil 3’te termik verimin tork değişim oranına göre arttığı görülmektedir. %0 tork değişim oranında motorin yakıtı (M100) ile yapılan deneylerde %26,04 olarak elde edilen termik verim, %50 tork değişim oranında % 6,56 oranında artarak %27,75 olarak elde edilmiştir. %90 tork değişim oranında ise %10,02 oranında artarak %28,65 olarak hesaplanmıştır. Tork değişim oranı arttıkça silindir içerisine giren motorin yakıtı azalmış, doğal gaz yakıtı ise artış göstermiştir. HCCI-DI çalışma şartlarında CNG yakıtının emme manifoldunda hava ile ön karışimli ve daha homojen bir şekilde karışarak silindir içerisine alınmasına bağlı olarak yanmada iyileşmesi ve termik verimde artış gerçekleşmiştir.



Şekil 3. Tork değişim oranına bağlı olarak termik verim değişimi

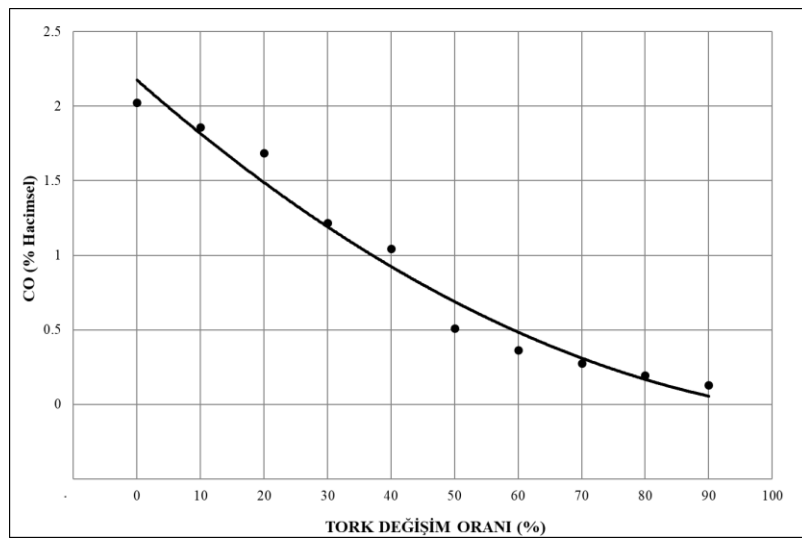
Singh ve Maji [25] tarafından yapılan motorin+CNG çift yakıtın kullanıldığı çalışmada, saf motorin, %30 CNG ve %60 CNG yakıtları ile deneyler yapılmıştır. 17,5 sıkıştırma oranında ve tam yük çalışma şartlarında yapılan deneylerde saf motorin yakıtına oranla %60 CNG yakıtı kullanılarak termik verimde %12,6 oranında artış elde edilmiştir (Şekil 4).



Şekil 4. Motor gücüne bağlı olarak termik verim değişimi [25]

### 3.3. Karbonmonoksit (CO) Emisyonları

Şekil 5'te CO emisyonlarının tork değişim oranına göre bağlı olarak değişimi görülmektedir. Saf motorin kullanımında %2,023 olan CO değeri, %50 tork değişim oranında (M50C50) %74,74 azalarak %0,511 olarak gerçekleşmiş, %90 tork değişim oranında ise %93,67 azalarak %0,128 olmuştur. CO emisyonunu etkileyen en önemli faktörler arasında hava fazlalık katsayısı ön plana çıkmaktadır. Özellikle stokiyometrik ve zengin karışım bölgelerinde eşdeğerlik oranının azalmasıyla CO konsantrasyonu da azalma göstermektedir [26]. Tork değişim oranının artması ile artan CNG yakıtına bağlı olarak hava fazlalık katsayısının artmasıyla CO emisyonunun azaldığı görülmektedir.

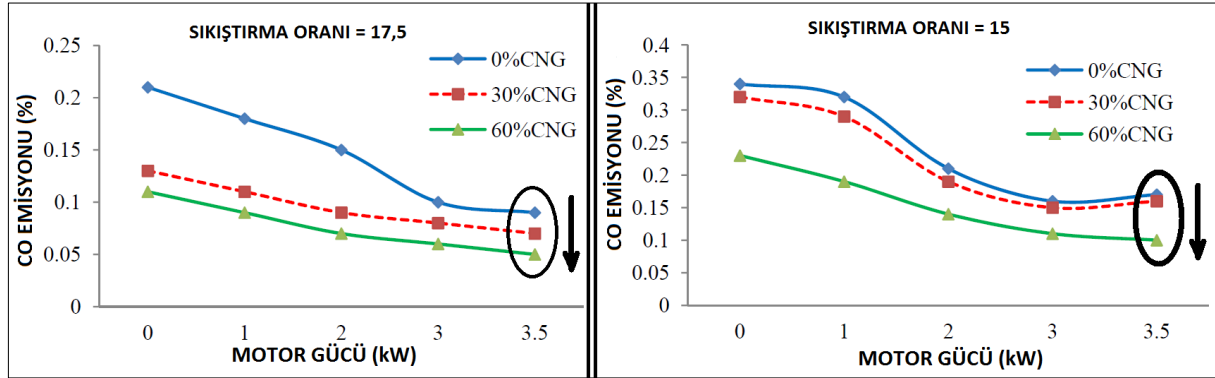


Şekil 5. Tork değişim oranına bağlı olarak CO değişimi

Singh ve Maji [25] tarafından yapılan çalışmada, 15 ve 17,5 sıkıştırma oranlarında çift yakıt (motorin ve CNG) kullanılarak motor gücüne bağlı CO emisyonu değişimini elde edilmiştir. Şekil 6'da görüldüğü gibi,



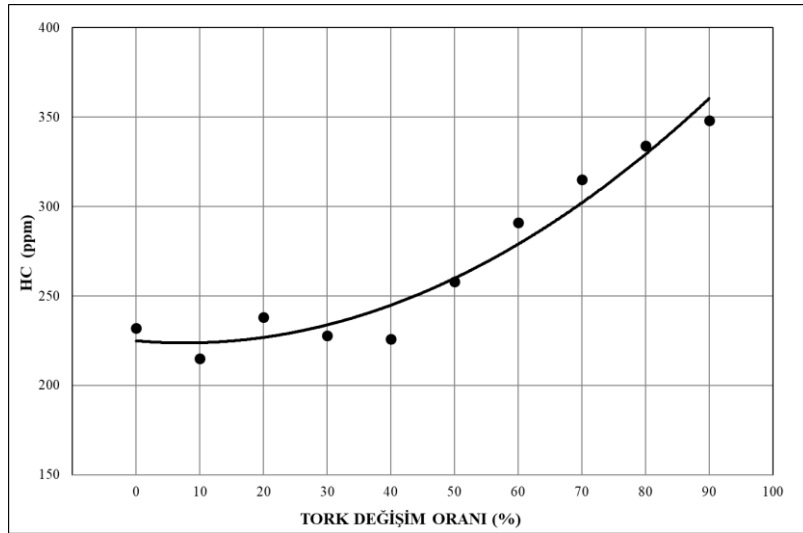
15 sıkıştırma oranında %30 CNG ve %60 CNG yakıtı ile yapılan deneylerde saf motorin yakıtına göre CO emisyonunda %33,3 - %61,9 arasında iyileşmeler elde edilmiştir.



Şekil 6. Motor gücüne bağlı olarak CO değişimi [25]

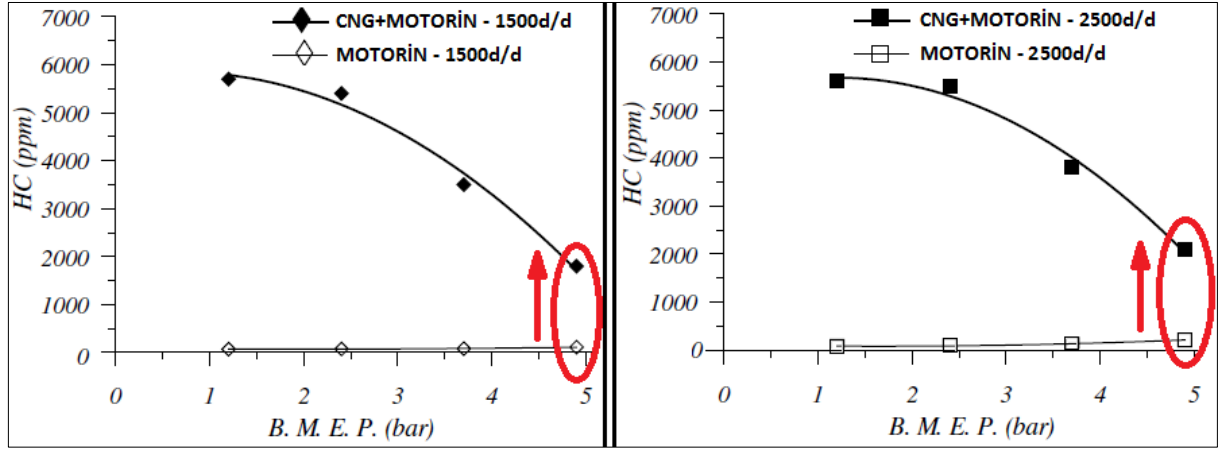
### 3.4. Hidrokarbon (HC) Emisyonları

HC emisyonunun tork değişim oranına göre ölçülen değerleri Şekil 7’de gösterilmiştir. Tork değişim oranı arttıkça HC emisyonunun da artış gösterdiği görülmektedir. Dizel yakıt kullanımında (M100) 232 ppm olarak ölçülen HC emisyonu değeri, %50 tork değişim oranında (M50C50) %11,20 artarak 258 ppm olarak ölçülmüş, %90 tork değişim oranında ise (M10C90) %50 oranında artarak 348 ppm olarak ölçülmüştür. HC emisyonlarına büyük oranda silindir cidarlarında kalan yanmamış yakıt birikintileri sebep olmaktadır. Yanma sonucu oluşan alevin soğuk silindir cidarlarına teması esnasında alevin sönümlenmesi gerçekleşir ve yanmamış HC emisyonları açığa çıkar [27-29]. Deneylerde tork değişim oranıyla silindir içerisinde artış gösteren doğal gaz yakıtı HC emisyonlarının artmasına neden olmaktadır.



Şekil 7. Tork değişim oranına bağlı olarak HC değişimi

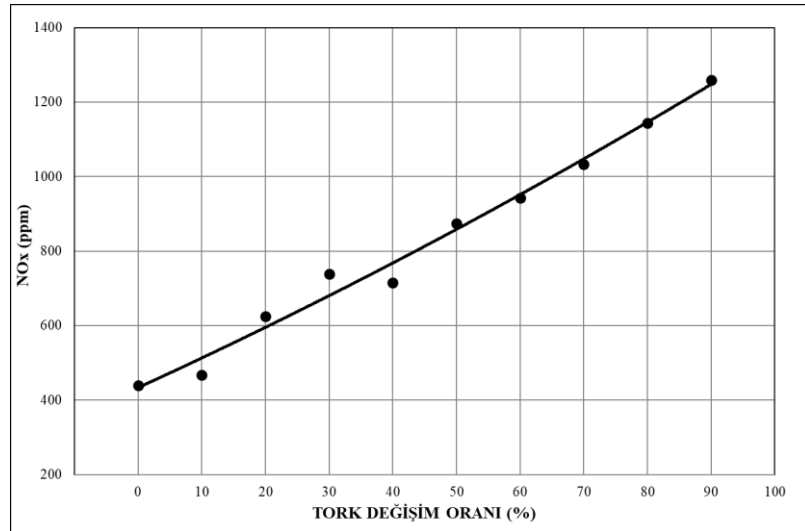
Papagiannakis ve Hontualas [5] tarafından yapılan çalışmada, sıkıştırma ateşlemeli bir motorda motorin ve CNG yakıtı kullanarak farklı motor devirlerinde gerçekleştirdikleri deneysel çalışmada da benzer sonuçlar elde edilmiştir, CNG kullanımına bağlı olarak HC emisyonları artmıştır (Şekil 8).



Şekil 8. Fren ortalama efektif basıncına bağlı olarak HC değişimi [5]

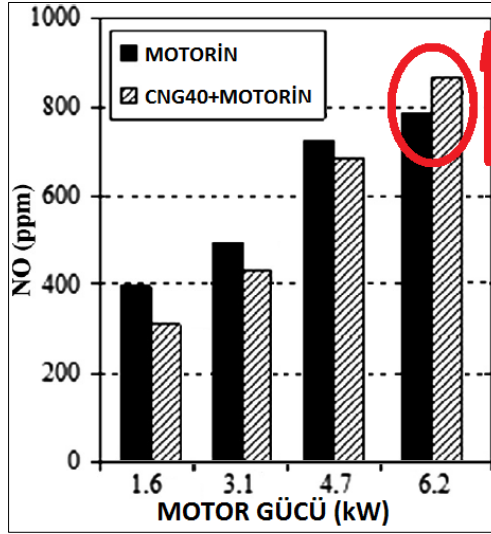
### 3.5. Azotoksit (NO<sub>x</sub>) Emisyonları

Şekil 9'da tork değişim oranına bağlı olarak NO<sub>x</sub> emisyonlarının değişimi görülmektedir. %0 tork değişim oranında motorin yakıtıyla yapılan deneylerde (M100) NO<sub>x</sub> emisyonları 440 ppm olarak ölçülmüştür. Tork değişim oranı arttıkça NO<sub>x</sub> emisyonları da artmıştır. %50 tork değişim oranında NO<sub>x</sub> %98,86 artarak 875 ppm olmuştur. %90 tork değişim oranında ise %186 oranında artış göstererek 1260 ppm olarak ölçülmüştür. Doğal gaz yakıtının alt ısıl değerinin motorin yakıtından yüksek olması nedeniyle, tork değişim oranı arttıkça silindir içerisine artarak giren doğal gaz miktarı ile silindir içi sıcaklık değerleri de artış göstermiştir [20]. Ayrıca silindir içi sıcaklıkların artmasıyla tutuşma gecikmesi azalmış ve yanma iyileşmiştir. Bu nedenlerden dolayı yanmanın iyileşmesi ve artan silindir içi sıcaklıklar NO<sub>x</sub> oluşumunu artırmıştır [24].



Şekil 9. Tork değişim oranına bağlı olarak NO<sub>x</sub> değişimi

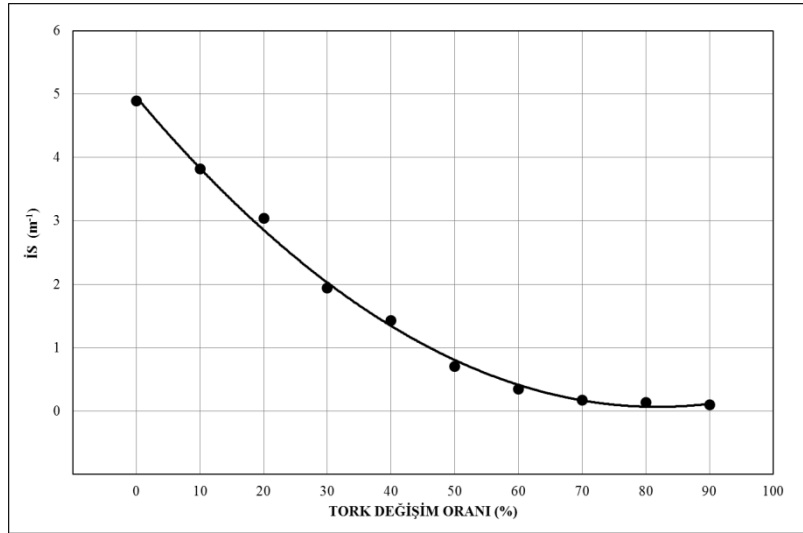
Karabektaş ve arkadaşlarının [24] Şekil 10'da gösterilen motorin ve CNG yakıtı kullanarak sıkıştırma ile ateşlemeli bir motorda yaptıkları deneysel çalışma sonuçları incelendiğinde benzer sonuçlar elde edilmiştir. Tam yükte CNG40+motorin yakıtı ile elde edilen NO<sub>x</sub> değerinin sadece motorin yakıtı ile elde edilen NO<sub>x</sub> değerinden yüksek olduğu görülmektedir.



Şekil 10. Motor gücüne bağlı olarak NOx değişimi [24]

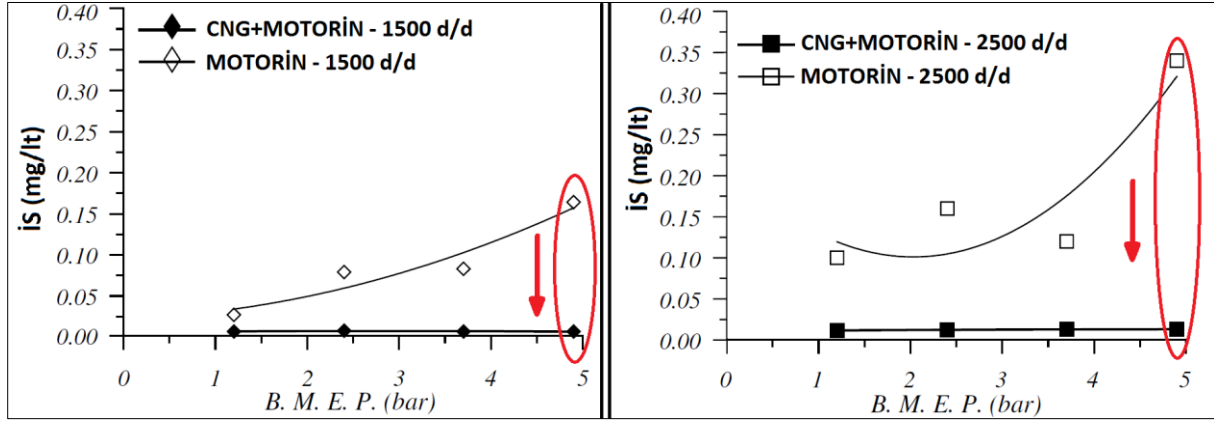
### 3.6. Is Emisyonları

Tork değişim oranı arttıkça azalan is emisyonlarının değişimi Şekil 11’de gösterilmiştir. Motorin (M100) yakıtıyla yapılan deneylerde 4,89 olarak ölçülen is emisyonu %50 tork değişim oranında %85,68 oranında azalarak 0,7 değeri ölçülmüştür. %90 tork değişim oranında ise %97,95 oranında azalarak 0,1 değeri ölçülmüştür. Is emisyonlarının azalmasının en önemli sebebi, silindir içerisine tork değişim oranıyla artarak sevk edilen CNG yakıtının hava fazlalık katsayısını artırmasıdır. Ayrıca tork değişim oranının artışı ile birlikte daha homojen bir karışım elde edilmesi de is emisyonlarını azaltmaktadır [25].



Şekil 11. Tork değişim oranına bağlı olarak is emisyonu değişimi

Papagiannakis ve Hontualas’ın [5] tarafından yapılan çalışmada, sıkıştırma ateşlemeli bir motorda saf motorin ve CNG+motorin yakıtı kullanarak 1500 ve 2500 d/d motor devirlerinde tam yükte is emisyonunun benzer şekilde azaldığı görülmektedir (Şekil 12).



Şekil 12. Fren ortalama efektif basıncına bağlı olarak is emisyonu değişimi [5]

#### 4. SONUÇLAR (CONCLUSION)

Bu çalışmada HCCI-DI dönüşümü yapılmış, tek silindirli, dört zamanlı, bir dizel motorunda ön karışımli CNG dolgusunun motor performansı ve egzoz emisyonlarına etkileri deneysel olarak incelenmiştir. Motorun maksimum moment devri olan 2200 d/d'da tam yük çalışma koşullarında, 0 – 90 tork değişim oranında yapılan deneylerde, özgül yakıt tüketimi, termik verim, CO, HC, NO<sub>x</sub> ve is emisyonlarının değişimleri incelenmiştir. Saf motorin yakıtı (M100) ile yapılan deneylere kıyasla % 90 tork değişim oranında (M10C90) özgül yakıt tüketimi %17,19, CO %93,67, is %97,95 oranında azalmıştır. Bununla birlikte termik verim % 10,02, HC %50, NO<sub>x</sub> ise %186 oranında artış göstermiştir. Bu sonuçlardan hareketle HCCI-DI bir motorda tam yükte doğal gaz kullanımının NO<sub>x</sub> ve HC emisyonlarında kötüleşmeye sebep olmasına karşın, termik verim, özgül yakıt tüketimi, CO ve is emisyonlarında önemli iyileştirmeler sağladığı görülmektedir. Ülkemizde boru hatları ve CNG tüpleri vasıtasıyla tüm şehirlerimizde ve birçok ilçemizde kolayca tedarik edilebilme imkânına sahip olan doğal gaz yakıtı, benzin ve motorin yakıtının yerini alma potansiyeline sahiptir. Hali hazırda özellikle ağır vasıtaların kullanımına sunulan şehirlerarası yollarda mevcut CNG istasyonlarının ülkemizde ve dünyada her geçen gün kullanımı artmaktadır [30]. CNG yakıtının motorlu taşıtlarda kullanım potansiyeli ve uygulanabilirliği göz önüne alınarak geleceğe yönelik çalışmalara önem verilmelidir.

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Z. Wang, G. Du, D. Wang, Y. Xu, M. Shao, Combustion process decoupling of a diesel/natural gas dual-fuel engine at low loads. Fuel, 232 (2018) 550-561.
- [2] A. Uyumaz, F. Boz, Ş. A. Baydır, Direkt enjeksiyonlu bir dizel motorunda atık zeytinyağı biyodizelinin yanma, performans ve emisyon karakteristikleri, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji, 6(1) (2018) 55-65.
- [3] A. P. Carlucci, A. De Risi, D. Laforgia, F. Naccarato, Experimental investigation and combustion analysis of a direct injection dual-fuel diesel–natural gas engine, Energy, 33(2) (2008) 256-263.
- [4] H. M. Cho, B. Q. He, Spark ignition natural gas engines - A review, Energy Conversion and Management, 48 (2007) 608-618.
- [5] R. G. Papagiannakis, D. T. Hountalas, Combustion and exhaust emission characteristics of a dual fuel compression ignition engine operated with pilot diesel fuel and natural gas, Energy Conversion and Management, 45(18-19) (2004) 2971-2987.
- [6] V. Pirouzpanah, R. K. Saray, A. Sohrabi, A. Niaei, Comparison of thermal and radical effects of EGR gases on combustion process in dual fuel engines at part loads, Energy Conversion and Management, 48 (2007) 1909-1918.

- [7] Y. Karagöz, T. Sandalcı, Ü.O. Köylü, A. S. Dalkılıç, S. Wongwises, Effect of the use of natural gas–diesel fuel mixture on performance, emissions, and combustion characteristics of a compression ignition engine, *Advances in Mechanical Engineering*, 8(4) (2016) 1-13.
- [8] W. Li, Z. Liu, Z. Wang, Experimental and theoretical analysis of the combustion process at low loads of a diesel natural gas dual-fuel engine, *Energy*, 94 (2016) 728-741.
- [9] M. Y. E. Selima, M. S. Radwanb, H. E. Salehb, Improving the performance of dual fuel engines running on natural gas/LPG by using pilot fuel derived from jojoba seeds, *Renewable Energy*, 33 (2008) 1173-1185.
- [10] G. S. Fritz, I. E. Ralph, Emissions from heavy-duty trucks converted to compressed natural gas, *SAE Transactions Journal of Commercial Vehicles*, 102(2) (1993) 538-552.
- [11] R. V. Basshuysen, *Natural gas and renewable methane for powertrains: Future strategies for a climate-neutral mobility*, Switzerland: Springer International Publishing, (2016) 100-114.
- [12] A. Brozat, Volkswagen Group expedites joint extension of gas mobility. Volkswagen Media Services. URL: <http://www.webcitation.org/query?url=https%3A%2F%2Fwww.volkswagen-media-services.com%2Fen%2Fdetailpage%2F-%2Fdetail%2FVolkswagen-Group-expeditesjoint-extension-of-gas-mobility%2Fview%2F4948078%2F&date=2017-12-21>, Son Erişim Tarihi: 21.12.2017.
- [13] Ş. Soysal, Volkswagen, CNG ailesini 2025'e kadar 10'a katlayacak. Volkswagen Haberler. URL:<http://www.webcitation.org/query?url=https%3A%2F%2Ftr.motor1.com%2Fnews%2F144457%2Fvw-cng-ailesi-2025-hedefi%2F&date=2017-12-21>, Son Erişim Tarihi: 21.12.2017.
- [14] İnternet: Der Golf TGI .(2017). Volkswagen Deutschland, Web: [https://www.volkswagen.de/de/models/golf-tgi.html#vw\\_m246\\_m532\\_jump\\_id\\_8](https://www.volkswagen.de/de/models/golf-tgi.html#vw_m246_m532_jump_id_8) Aralık 2017'de alınmıştır.
- [15] Ö. Can, Bir DI dizel motorda etanol ön karışımli kısmi-HCCI uygulamasının yanma ve emisyonlar üzerine etkilerinin incelenmesi, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, (2012) 41-104.
- [16] H. Zhao, *HCCI and CAI Engines for the Automotive Industry*. England: Woodhead Publishing Limited, (2007) 19-509.
- [17] M. Ghazikhani, M. R. Kalateh, Y. K. Toroghi, M. Dehnavi, An experimental study on the effect of premixed and equivalence ratios on CO and HC emissions of dual fuel HCCI engine, *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 52 (2008) 130-135.
- [18] M. Christensen, B. Johansson, P. Einewall, Homogeneous charge compression ignition (HCCI) using isooctane, ethanol and natural gas – a comparison with spark ignition operation, *Society of Automotive Engineering*, Paper No: 972874. (1997).
- [19] A. A. Hairuddin, T. Yusaf, A. P. Wandel, A review of hydrogen and natural gas addition in diesel HCCI engines, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 32 (2014) 739-761.
- [20] İnternet: <https://www.anadolumotor.com/tr/urunler/antor-6-ld-400> (2018).
- [21] A. H. Kakaee, A. Paykani, M. Ghajar, The influence of fuel composition on the combustion and emission characteristics of natural gas fueled engines, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 38 (2014) 64-78.

- [22] Bosch BEA 350 Emission Analysis Users Manuel. (2018).
- [23] AVL 4000 DiSmoke Emission Analysis Users Manuel. (2018).
- [24] M. Karabektas, G. Ergen, M. Hoşöz, The effects of using diethylether as additive on the performance and emissions of a diesel engine fuelled with CNG, *Fuel*, 115 (2014) 855-860.
- [25] R. Singh, S. Maji, Performance and exhaust gas emissions analysis of direct injection CNG-diesel dual fuel engine, *International Journal of Engineering Science and Technology (IJEST)*, 4(3) (2012) 837-838.
- [26] J. B. Heywood, *Internal Combustion Engine Fundamentals.*, New York: McGraw-Hill Publishing Company, (1988).
- [27] M. Odaka, N. Koike, Y. Tsukamoto, K. Narusawa, Optimizing control of NO<sub>x</sub> and smoke emissions from DI engine with EGR and methanol fumigation, *SAE Paper No: 920468*, (1992).
- [28] X. Lü, J. Ma, L. Ji, Z. Huang, Simultaneous reduction of NO<sub>x</sub> emission and smoke opacity of biodiesel-fueled engines by port injection of ethanol, *Fuel*, 87(7) (2008) 1289–1296.
- [29] M. Yao, Z. Chen, Z. Zheng, B. Zhang, Y. Xing, Study on the controlling strategies of homogeneous charge compression ignition combustion with fuel of dimethyl ether and methanol, *Fuel*, 85 (2006) 2046-2056.
- [30] İnternet: SOCAR Turkey Petrol Enerji Dağıtım San. Tic. A.Ş. (2018)., Web: <http://www.socarenerji.com/%C4%B0stasyonlar%C4%B1m%C4%B1z> 25 Aralık 2018'de alınmıştır.