



POLİTEKNİK DERGİSİ

*JOURNAL of POLYTECHNIC*

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.org.tr/politeknik>



# Buji ile ateşlemeli bir motorda ikincil hava enjeksiyonunun egzoz emisyonları ve katalitik konvertör verimine etkisinin deneysel analizi

## *The experimental analysis of the effect of secondary air injection on exhaust emissions and catalytic converter efficiency in an SI engine*

Yazar(lar) (Author(s)): Erdi DEMİRCİ<sup>1</sup>, Tolga TOPGÜL<sup>2</sup>, Uğur ÖZEL<sup>3</sup>

ORCID<sup>1</sup>: 0000-0003-2567-1807

ORCID<sup>2</sup>: 0000-0003-1347-9594

ORCID<sup>3</sup>: 0000-0001-9929-523X

**Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article):** Demirci E., Topgül T. ve Özel U., “Buji ile ateşlemeli bir motorda ikincil hava enjeksiyonunun egzoz emisyonları ve katalitik konvertör verimine etkisinin deneysel analizi”, *Politeknik Dergisi*, 25(2): 861-869, (2022).

**Erişim linki (To link to this article):** <http://dergipark.org.tr/politeknik/archive>

**DOI:** 10.2339/politeknik.908649

# Buji ile Ateşlemeli Bir Motorda İkincil Hava Enjeksiyonunun Egzoz Emisyonları ve Katalitik Konvertör Verimine Etkisinin Deneysel Analizi

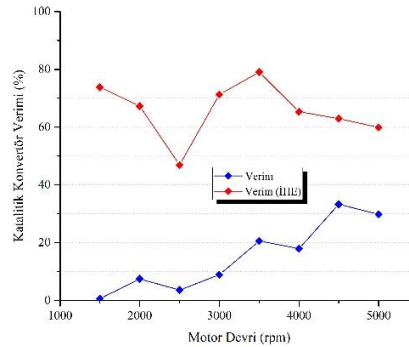
## The Experimental Analysis of the Effect of Secondary Air Injection on Exhaust Emissions and Catalytic Converter Efficiency in an SI Engine

### Önemli noktalar (Highlights)

- ❖ Egzoz emisyonları ve emisyon kontrol yöntemleri / Exhaust emissions and emissions control methods
- ❖ Tam ve kısmi motor yüklerinde konvertör verimi / The converter efficiency at full and partial engine loads

### Grafik Özet (Graphical Abstract)

Bu çalışmada buji ile ateşlemeli bir motorda emisyon kontrol yöntemi olan ikincil hava enjeksiyonun tam ve kısmi motor yüklerinde katalitik konvertör verimine etkisi deneysel olarak analiz edilmiştir. / In this study, the effect of secondary air injection, which is an emission control method in an SI engine, on catalytic converter efficiency at full and partial engine loads was analyzed experimentally.



Şekil. Katalitik konvertör verimi /Figure. The efficiency of the catalytic converter

### Amaç (Aim)

Bu çalışma buji ile ateşlemeli bir motorda farklı çalışma koşullarında ikincil hava enjeksiyonunun egzoz emisyonları ve konvertör verimine etkisini belirlemeyi hedeflemiştir. / This study aims to determine the effect of secondary air injection on the exhaust emissions and converter efficiency under different operating conditions in an SI engine.

### Tasarım ve Yöntem (Design & Methodology)

Bu çalışma ikincil hava enjeksiyonuna sahip buji ile ateşlemeli motorda İHE devre dışı bırakılarak ve aktive edilerek deneysel olarak gerçekleştirilmiştir. / This study was carried out experimentally by deactivating and activating SAI in an SI engine equipped with secondary air injection.

### Özgünlük (Originality)

İkincil hava enjeksiyonunun konvertörün etkinliğine etkisi deneysel olarak motorun çeşitli çalışma koşullarında incelenmiştir. / The effect of secondary air injection on the efficiency of the converter has been experimentally investigated in a variety of engine operating conditions.

### Bulgular (Findings)

İkincil hava enjeksiyonunun etkinliğinde motorun çalışma koşulları etkili olmuştur. / The engine operating conditions were effective in the effectiveness of the secondary air injection.

### Sonuç (Conclusion)

İkincil hava enjeksiyonu, konvertörün etkinliğini stokiometrik hava/yakıt oranından daha zengin çalışma koşullarında arttırmıştır. / Secondary air injection increased the efficiency of the converter under operating conditions richer than the stoichiometric air/fuel ratio.

### Etik Standartların Beyanı (Declaration of Ethical Standards)

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler. / The author(s) of this article declare that the materials and methods used in this study do not require ethical committee permission and/or legal-special permission.

# Buji ile Ateşlemeli Bir Motorda İkincil Hava Enjeksiyonunun Egzoz Emisyonları ve Katalitik Konvertör Verimine Etkisinin Deneysel Analizi

*Araştırma Makalesi / Research Article*

**Erdi DEMİRCİ<sup>1</sup>, Tolga TOPGÜL<sup>2\*</sup>, Uğur ÖZEL<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Oyak Beton Sanayi ve Ticaret A. Ş., Makine Bakım ve Yatırım Müdürlüğü, Ankara, Türkiye

<sup>2</sup>Teknoloji Fakültesi, Otomotiv Mühendisliği Bölümü, Gazi Üniversitesi, Türkiye

<sup>3</sup>Teknoloji Fakültesi, Otomotiv Mühendisliği Bölümü, Kocaeli Üniversitesi, Türkiye

(Geliş/Received : 02.04.2021 ; Kabul/Accepted : 07.07.2021)

## ÖZ

İçten yanmalı motorlarda gücün elde edilmesi yanma olayının bir sonucunun olması ve yanmanın belirli bir süre içerisinde gerçekleşmesi kirlenici emisyonlarını kaçınılmaz yapmaktadır. Ancak emisyon kontrol yöntemleriyle bu durum kontrol altına alınmaya çalışılmaktadır. Bu çalışmada da tek nokta yakıt enjeksiyonuna sahip buji ile ateşlemeli motorda ikincil hava enjeksiyonunun (İHE) ve üç yollu katalitik konvertörün CO, HC ve NO emisyonlarına etkisi deneysel olarak incelenmiştir. Deneyler 1500-5000 rpm motor devri aralığında tam yükte ve 2500 rpm sabit motor devrinde (maksimum tork devri) motor yükü değiştirilerek yapılmıştır. İHE, konvertörün CO ve HC emisyonlarını dönüştürme verimini motorun stokiometrik hava/yakıt oranından daha zengin çalıştığı koşullarda artışı sağlarken, NO emisyonunun dönüşümünü olumsuz etkilememiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Buji ile ateşlemeli motor, Emisyon kontrol yöntemleri, İkincil hava enjeksiyonu, Katalitik konvertör, Egzoz emisyonları.

## The Experimental Analysis of the Effect of Secondary Air Injection on Exhaust Emissions and Catalytic Converter Efficiency in an SI Engine

### ABSTRACT

The pollutant emissions from the internal combustion engines are inevitable due to the power is obtained in internal combustion engines is a result of the combustion event and the combustion happens in a limited time. However, this issue is tried to be controlled by emission control methods. In this study, the effects of secondary air injection (SAI) and three-way catalytic converter on CO, HC, and NO emissions in a spark-ignition engine with single-point fuel injection were experimentally investigated. The experiments were conducted at 2500 rpm constant engine speed (maximum torque speed) by varying the engine load and in the 1500-5000 rpm engine speed range at full load. While SAI increased the conversion efficiencies of the CO and HC emissions of the converter under conditions where the engine was operating richer than the stoichiometric air/fuel ratio, it did not adversely affect the conversion of NO emissions.

**Keywords:** Spark ignition engine, Emission control methods, Secondary air injection, Catalytic converter, Exhaust emissions.

### 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

İçten yanmalı motorlar günümüzün talep ettiği hız, konfor ve sürdürülebilirlik ihtiyaçlarını karşılamaya başarıyla devam etmektedirler. Araştırmacılar daha güçlü, daha verimli ve daha çevreci motorlar ve taşıtlar için çalışmalarını sürdürmektedirler. İçten yanmalı motorların kullanılabilirliğini sağlayacak temel unsurlardan birisi belki de en önemlisi çevreye olan etkileridir. Enerjinin elde edilmesi bir başka deyişle yakıtın ısı enerjisinin mekanik enerjiye dönüşümünün

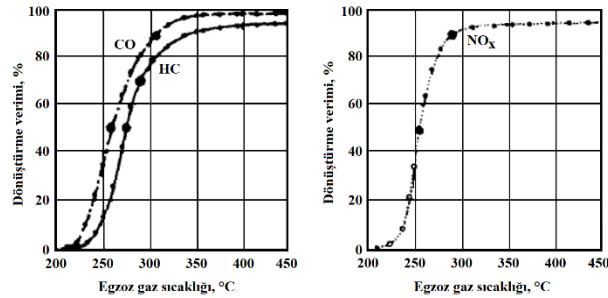
yanma olayı ile gerçekleşmesi ve bu olayın oldukça kısa sürede gerçekleşmek zorunda olması kirlenici olarak tanımladığımız egzoz emisyonlarının oluşmasını kaçınılmaz hale getirmektedir. Bu nedenle egzoz emisyonlarının azaltılmasını sağlayacak çalışmalar sadece yanma odasında sınırlı kalmamaktadır. Yanma öncesinde ve yanma sonrasında da egzoz emisyonlarını azaltmaya yönelik önlemler alınmaktadır. Bu çalışmada da içten yanmalı bir motorda (buji ile ateşlemeli motor) egzoz emisyonlarını yanma sonrasında azaltmaya yönelik olarak kullanılan katalitik konvertör ve ikincil hava enjeksiyonunun etkinliği araştırılmıştır.

\*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)  
e-posta : topgul@gazi.edu.tr

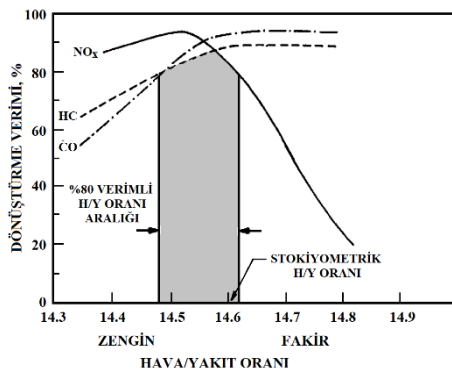
## 2. KATALİTİK KONVERTÖRLER (CATALYTIC CONVERTERS)

Buji ile ateşlemeli motorlarda üç yollu katalitik konvertörler, yanma sonrasında kirletici olarak tanımlanan egzoz emisyonlarının (CO, HC ve NO<sub>x</sub>) azaltılmasında etkin bir şekilde kullanılmaktadırlar. Konvertörlerin bu görevi başarılı bir şekilde yerine getirebilmeleri motorun çalışma şartlarıyla yakında ilişkilidir [1-3]. Bununla birlikte motorun çalışma parametreleri egzoz emisyonlarının değişiminde önemli bir etkiye sahiptirler [4-9]. Bir katalitik konvertörün verimi, egzoz sıcaklığı ve hava/yakıt oranı olmak üzere iki temel faktöre bağlıdır [1, 2, 10].

Konvertörün sıcaklığı 400 °C veya üzerinde iken CO emisyonları %98-99, HC emisyonları %95 ve üzerinde, NO<sub>x</sub> emisyonları ise %95 verimlilikle dönüştürülebilmektedir (Şekil 1). Bununla birlikte yüksek dönüştürme verimi elde etmek için motorun doğru hava/yakıt oranında çalıştırılması gereklidir (Şekil 2) [2]. Aslında yüksek verimin elde edildiği çalışma aralığı oldukça dar bir penceredir ( $\lambda=0,995-1,005$ ) [1].



**Şekil 1.** Konvertörün CO, HC ve NO<sub>x</sub> emisyonlarını dönüştürme verimine egzoz gaz sıcaklığının etkisi (The effect of the exhaust gas temperature on the conversion efficiencies of CO, HC, and NO<sub>x</sub> emissions) [1]



**Şekil 2.** Konvertörün CO, HC ve NO<sub>x</sub> emisyonlarını dönüştürme verimine hava/yakıt oranının etkisi (The effect of the air/fuel ratio on the conversion efficiencies of CO, HC, and NO<sub>x</sub> emissions) [10, 11]

Literatürde egzoz emisyonlarının azaltılmasında değerlendirilen bir sistem olan ikincil hava enjeksiyonu katalitik konvertörle birlikte kullanılmaktadır. Onorati, Ferrari ve D'Errico tarafından yapılan çalışmada [12], soğuk çalıştırma ve ısınma sürecinde motor zengin

karişimla çalışırken ikincil hava enjeksiyonu daha fazla oksijen sağladığından kirletici emisyonların azaltılmasında önemli fayda sağlayabildiği sonucuna varılmıştır. Kochs vd. tarafından yapılan çalışmada [13] katalitik konvertörün %50 verimle çalışmaya başladığı sıcaklığa erişme süresini kısaltması ikincil hava enjeksiyonu uygulamasının yaygınlaştırılmasını sağlayacağı belirtilmiştir. Kollmann ve çalışma arkadaşları [14], geliştirilen elektrikli fanlı ikincil hava enjeksiyonunun soğukta ilk hareket sürecinde egzoz emisyonlarına etkisini araştırmışlardır. Motoru soğuk çalıştırmada ikincil hava enjeksiyonu hem sıcak egzoz supaplarında egzotermik reaksiyon meydana getirerek sıcaklık artışı sağlaması hem de soğuk çalıştırmada yakıt zenginleştirilmesi sırasında konvertöre yeterli hava sağlaması sayesinde egzoz emisyonlarının azaltılmasında etkili olduğu belirtilmiştir. Çalışmada elektrikli fanlı ikincil hava enjeksiyonunun HC emisyonunda %53, CO emisyonunda ise; %75 iyileşme sağladığı sonucu elde edilmiştir. Mahadevan ve Subramanian [15], katalitik konvertörün egzoz manifolduna göre konumu ve sıcak hava (80°C) enjektörü uygulamasının konvertör verimine etkisini araştırmışlardır. Çalışmada, konvertör ile egzoz manifoldu arasında 150 mm uzunluğunda ve sırasıyla 20, 25, 30, 40, 50 ve 60 mm çaplarında aralarında sızdırmazlık sağlanan altı borudan oluşan telekopik boru kullanılmıştır. Dinamik katalitik konvertör sistemi adının verildiği bu sistemde konvertörün egzoz manifolduna mesafesi değişken hale getirilmiştir. Konvertör öncesinde sıcak hava enjektörü kullanılarak katalitik konvertörün CO emisyonunu %50 verimle dönüştürmeye başladığı sıcaklığa erişme süresi katalitik konvertör 1. konumda iken (egzoz manifoldu ile konvertör arasındaki mesafe 150 mm) 12 s iken egzoz manifoldundan uzaklaştıkça (6. Konum-egzoz manifoldu ile konvertör arasındaki mesafe 900 mm) sürenin 22 saniyeye arttığı görülmüştür. Konum 1'de konvertörün 12 saniyede %50 verimle çalışmaya başladığı sıcaklığa erişme süresi, aynı konumda ve aynı durumda sıcak hava enjektörsüz iken 44 saniyeye çıktığı görülmüştür. 1. konumda ve sıcak hava enjektörü kullanılarak konvertörün HC emisyonunu %50 verimle dönüştürmeye başladığı sıcaklığa erişme süresi 24 saniye iken aynı konumda sıcak hava enjektörü kullanılmadığı durumda ise; 52 saniye olduğu görülmüştür. Çalışmada sıcak hava ilavesinin konvertörün daha hızlı %50 verimle çalışmaya başladığı sıcaklığa ulaşması için egzoz sıcaklığını arttırmanın yanı sıra CO ve HC emisyonlarının oksidasyonu için ilave oksijen sağladığı ifade edilmiştir.

Yapılan bu çalışmada tek nokta yakıt enjeksiyon sistemine sahip buji ile ateşlemeli bir motorda ikincil hava enjeksiyonunun egzoz emisyonları ve konvertör verimine etkisi deneysel olarak incelenmiştir.

## 3. MATERYAL METOT (MATERIAL METHOD)

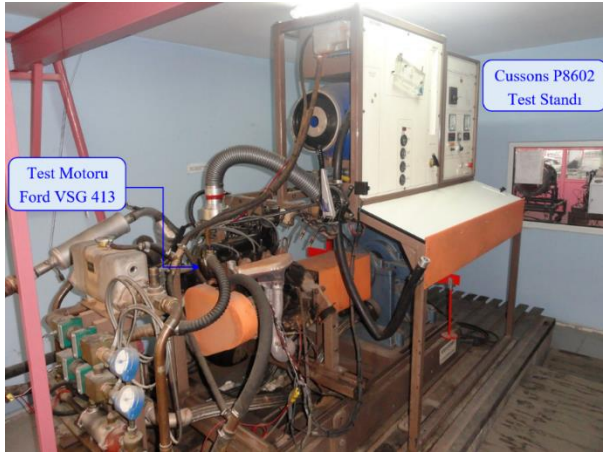
İkincil hava enjeksiyonunun egzoz emisyonları ve konvertörün çalışmasına etkisinin deneysel olarak

incelendiği bu çalışmada kullanılan test motorunun teknik özellikleri Çizelge 1’de verilmiştir.

**Çizelge 1.** Test motorunun teknik özellikleri (Technical specifications of the test engine)

Deney motoru	Ford VSG 413
Toplam kurs hacmi	1297 cm <sup>3</sup>
Sıkıştırma oranı	8,8:1
Maksimum motor torku	98 Nm (2500 rpm)
Maksimum motor gücü	43 kW (5000 rpm)

Deney motoru, çeşitli deneysel verilerin alınması (motor devri, motor torku, hava ve yakıt tüketimleri, çevre sıcaklığı vb.) ve motorun yük altında çalışmasını temin etmek amacıyla Cussons P8602 test standına bağlanmıştır (Şekil 3). Şekil 4’te test düzeneğinin şematik görünümü verilmiştir.



**Şekil 3.** Deney motoru ve test standı (Test engine and test stand)

Egzoz emisyonları, konvertör öncesinden ve sonrasında sırayla ölçülmüş ve ölçüm işleminde Sun MGA 1500s egzoz gaz analizörü kullanılmıştır. Egzoz emisyon ölçüm sonuçları, cihazın RS-232 portu üzerinden haberleşme

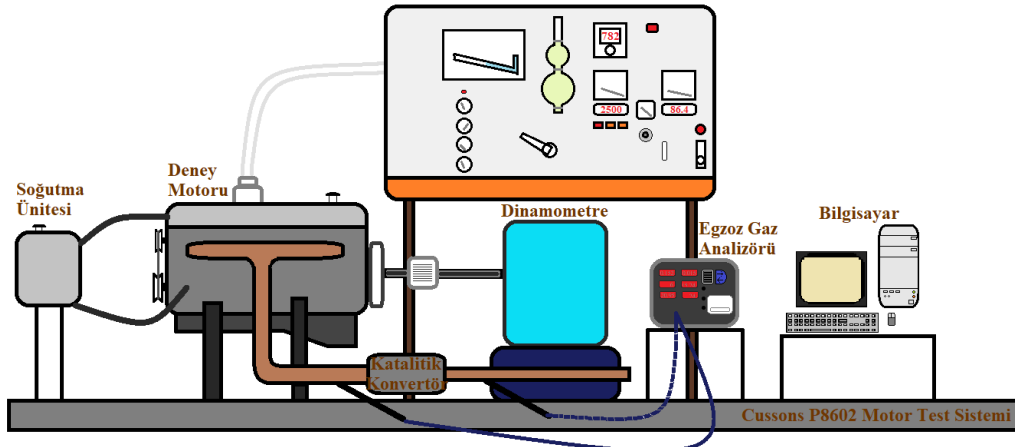
protokolüne uygun olarak hazırlanan ara yüz programı ile masaüstü bilgisayarına alınarak veriler depolanmıştır. Ölçüm işleminde, ölçüm yapılan noktaya (konvertör öncesi veya sonrası) egzoz probu bağlanmış ve egzoz emisyon değerleri stabil olduğunda ara yüz programında ölçüm işlemi butonuna basılmış ve ardından 5 ölçüm sonucu alınarak bu ölçümler ve ölçümlerin aritmetik ortalaması ayrı ayrı dosyalara kaydedilmiştir. Konvertör öncesi ve sonrasında sırasıyla yapılan ölçümlerin ardından motor çalışma şartları değiştirilmeden ölçüm aynı şekilde 2. kez tekrarlanmıştır. Egzoz emisyonlarının değerlendirilmesinde 1. ve 2. ölçümden elde edilen aritmetik ortalamalar dikkate alınmıştır. Egzoz gaz analizörünün teknik özellikleri Çizelge 2’de verilmiştir.

**Çizelge 2.** Egzoz gaz analizörünün teknik özellikleri (Technical specifications of the exhaust gas analyzer)

	Ölçüm Aralığı	Hata
CO	0-14 (% Hacimsel)	±%5
HC	0-9999 (ppm)	0-5000 ±%5 5000-9999 ±%10
NO	0-5000 (ppm)	±%5
CO <sub>2</sub>	0-18 (% Hacimsel)	±%5
O <sub>2</sub>	0-25 (% Hacimsel)	±%5

Deneylerin gerçekleştirildiği buji ile ateşlemeli motor standart olarak ikincil hava enjeksiyonuna sahip olduğundan deneyler bu sistemi devre dışı bırakarak ve devreye alarak iki aşamada gerçekleştirilmiştir. Devreye alındığında sistemin çalışma düzenine herhangi bir müdahalede bulunulmamıştır.

Motor üzerinde standart olarak yer alan ikincil hava enjeksiyon sistemi hava enjektörlerinin egzoz manifolduna bağlı hali Şekil 5.a’da görülmektedir. Her bir silindire ait egzoz çıkışına doğru uzanan bu hava enjektörleri motora ikinci bir hava girişi sağlamakta ve bu nedenle bu sistem “İkincil Hava Enjeksiyonu” olarak adlandırılmaktadır. Uygulanan bu ilave hava girişi ile



**Şekil 4.** Test düzeneği (Experimental setup)



katalitik konvertör öncesinde egzoz gazları içerisindeki oksijen konsantrasyonu artmaktadır. Şekil 5.b’de sistemin sökülmüş hali görülmektedir. İkincil hava enjeksiyon sistemi söküldükten sonra egzoz manifoldu üzerindeki montaj noktaları aynı vida dış yapısına sahip cıvatalar ile kapatılarak sistem devre dışı bırakılmıştır (Şekil 5.c).



**Şekil 5.** a. İkincil hava enjeksiyon sisteminin egzoz manifolduna bağlı hali b. İkincil hava enjeksiyon sistemi hava enjektörleri c. Sistem devre dışı bırakıldığında egzoz manifoldu üzerinde yer alan hava enjektörleri bağlantı noktalarının kapatılmış hali (a. The secondary air injection system mounted to the exhaust manifold b. The air injectors of the secondary air injection system c. The closed air injectors connection points on the exhaust manifold in case of the disabled system)

Deneyler iki aşamada gerçekleştirilmiştir. İlk aşamada motor 1500-5000 rpm devir aralığında tam yükte (%100 GKA) çalıştırılmıştır. İkinci aşamada ise; 2500 rpm sabit motor devrinde (maksimum tork devri) motor yükü değiştirilerek deneyler yapılmıştır. Deneylerde motorun normal çalışma sıcaklığına ulaşması sağlanmış ve ölçümler buna göre yapılmıştır.

Katalitik konvertörün verimi, Eşitlik 1 ile ifade edilebilir:

$$\eta_{\text{konvertör}}(\%) = \left(1 - \frac{\text{Egzoz Emisyonu}_{\text{çıkış}}}{\text{Egzoz Emisyonu}_{\text{giriş}}}\right) \times 100 \quad (1)$$

Denklemden belirtilen “Egzoz Emisyonu” ifadesi dönüştürülme verimi belirlenecek olan CO, HC veya NO emisyonunu temsil etmektedir. Giriş ve çıkış alt indisleri sırasıyla katalitik konvertör öncesini ve sonrasını belirtmektedir.

Çalışmada motor yükü için FOEB olarak ifade edilen büyüklük kullanılmıştır. Eşitlik 2’de motorun efektif gücü ve Eşitlik 3’te FOEB’nin hesaplanmasında kullanılan denklemler verilmiştir.

$$P_e(\text{kW}) = 2\pi \times n_m(\text{rpm}) \times T_m(\text{Nm}) \times 10^{-3}/60 \quad (2)$$

Eşitlik 2’de yer alan  $P_e$  motorun efektif gücünü,  $n_m$  motorun dakikadaki devir sayısını ve  $T_m$  motor torkunu ifade etmektedir.

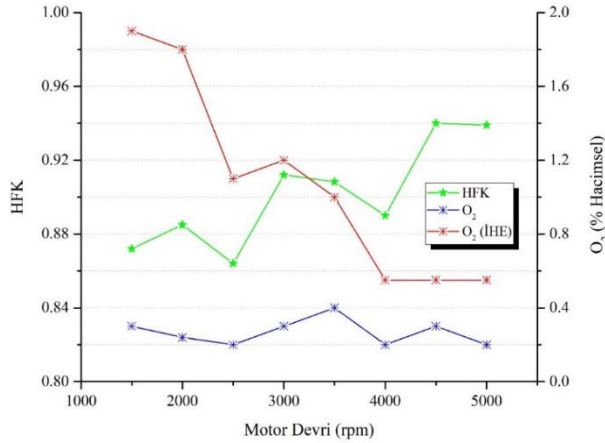
$$\text{FOEB}(\text{kPa}) = \frac{60 \times P_e(\text{kW}) \times n_R \times 10^3}{V_{\text{kurs}}(\text{dm}^3) \times n_m(\text{rpm})} \quad (3)$$

Eşitlik 3’te yer alan  $n_R$  her bir çevrimdeki iş zamanı için krank milinin devir sayısını (dört zamanlı motorlarda 2 ve iki zamanlı motorlarda 1) ve  $V_{\text{kurs}}$  ise; motorun toplam kurs hacmini ifade etmektedir.

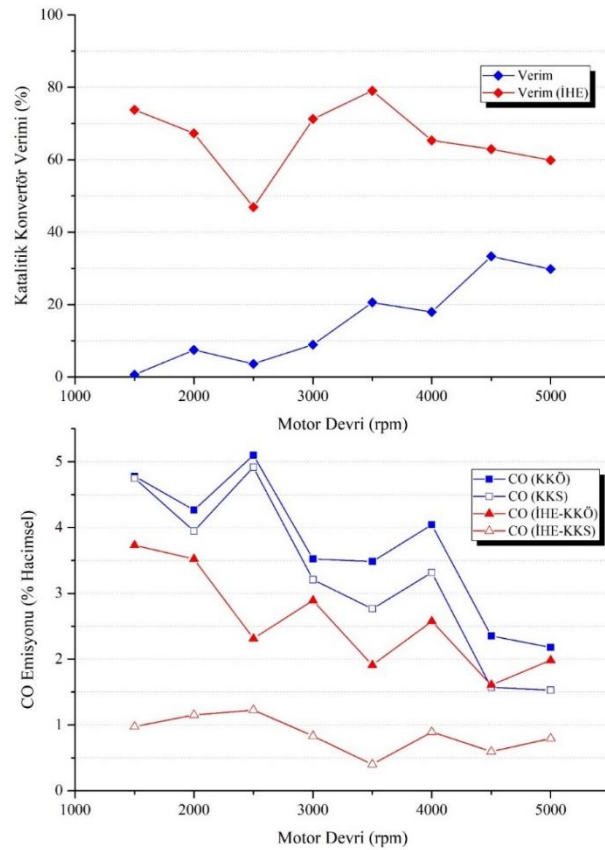
#### 4. BULGULAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSIONS)

Deneyel çalışma temel olarak motor devrinin ve motor yükünün esas alındığı iki durum için gerçekleştirilmiştir. Değişkenin motor devri olduğu deneyler sabit yükte (tam yükte-%100 GKA) ve değişkenin motor yükü olduğu deneyler sabit motor devrinde (2500 rpm) gerçekleştirilmiştir.

Deneyel çalışmanın ilk aşamasında motor 1500-5000 rpm aralığında tam yükte çalıştırılmıştır. Hava/yakıt oranının bir göstergesi olan HFK’nın bu koşullardaki değişimi Şekil 6’da görülmektedir. Motor tam yük şartlarında çalışırken tüm motor devirleri boyunca yakıt enjeksiyon sistemi güç moduna uygun olarak zengin karışımla ( $\lambda < 1$ ) motorun çalışmasını sağlamaktadır. Hava/yakıt oranının konvertörün dönüştürme verimine etkisinin verildiği Şekil 2’de görüldüğü gibi CO ve HC emisyonları için motorun zengin karışımla çalıştığı bu tür şartlarda dönüştürme verimi düşük gerçekleşmektedir. İHE’nin devre dışı bırakıldığı ve motorun zengin karışımla çalıştığı bu şartlarda Şekil 6’da görüldüğü gibi egzoz gazı içerisindeki oksijen konsantrasyonu azalmaktadır.



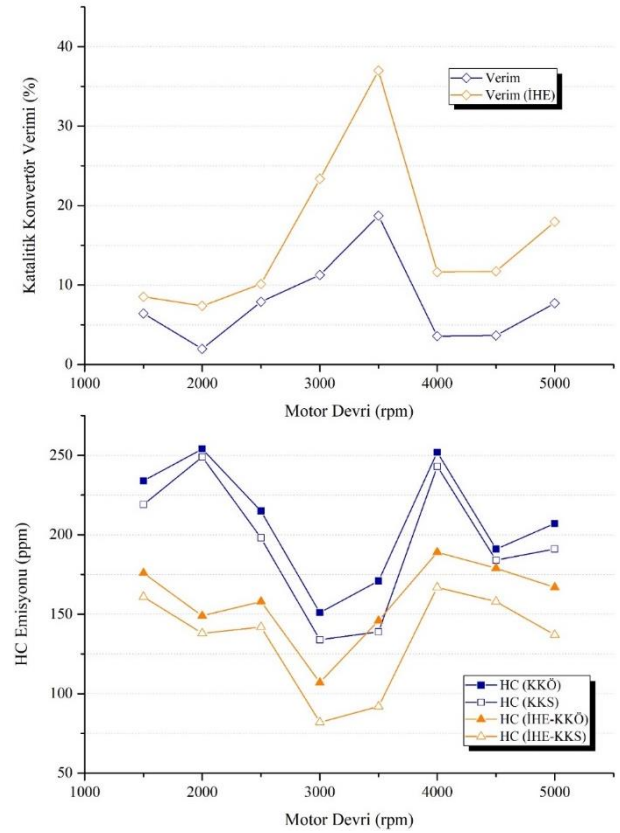
**Şekil 6.** Tam yükte motor devrine bağlı olarak HFK ve O<sub>2</sub> konsantrasyonunun değişimi (The variation of the relative air-fuel ratio and O<sub>2</sub> concentration depending on engine speed at full load)



**Şekil 7.** Konvertör öncesi ve sonrasında CO emisyonunun değişimi ve konvertör dönüştürme verimi (The conversion efficiency of the converter and the variation of CO emission before and after the converter)

Konvertör öncesinde zengin çalışmanın neden olduğu yüksek CO ve HC emisyonlarının konvertör sonrasında da dönüştürme veriminin düşük olması nedeniyle dikkate değer bir değişim göstermediği Şekil 7 ve Şekil 8'de görülmektedir. Ancak İHE aktifleştirildiğinde egzoz gazı

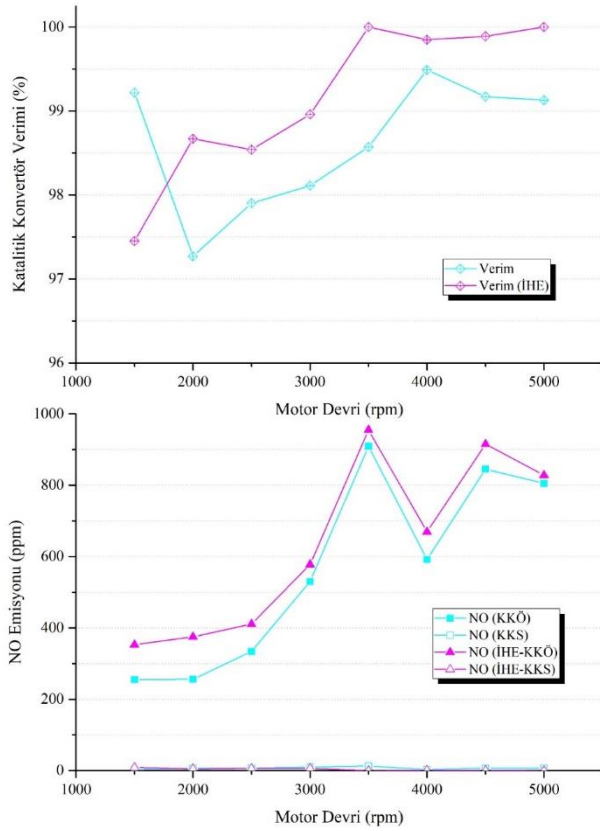
içerisindeki oksijen miktarının ortalama olarak 3,2 kat arttığı (Şekil 6) ve konvertör veriminin iyileşmesine katkıda bulunduğu görülmüştür. Şekil 7 ve Şekil 8'de görüldüğü gibi İHE devre dışı iken CO ve HC emisyonlarının dönüştürme verimleri %50'nin oldukça altında olmasına rağmen İHE'nin aktif olması ile birlikte her iki verim de artmaktadır. Özellikle CO emisyonunda verim yaklaşık %80'e ulaşmaktadır. İHE'nin aktifleştirilmesiyle konvertörde CO ve HC'nin oksidasyonunu sağlayacak ilave oksijen sağlanmakta ve CO ile HC için konvertörün daha verimli çalıştığı stokiometrik H/Y oranına yaklaşılmaktadır. CO emisyonu için verim ortalama olarak %15,3'ten %65,8'e ve HC emisyonu için verim ortalama olarak %7,7'den %16'ya yükselmiştir.



**Şekil 8.** Konvertör öncesi ve sonrasında HC emisyonunun değişimi ve konvertör dönüştürme verimi (The conversion efficiency of the converter and the variation of HC emission before and after the converter)

Katalitik konvertörün CO ve HC emisyonlarını dönüştürme verimlerine hava/yakıt oranının etkisi dikkate alındığında Şekil 2'deki gibi verimin stokiometrik orandan daha zengin karışımlarda düşük iken karışım fakirleştiğinde artış gösterdiği görülmektedir. CO ve HC emisyonlarının aksine NO<sub>x</sub> için verim, zengin bölgede daha yüksektir ve karışım stokiometrik orandan daha fazla fakirleştirildiğinde azalmaktadır. Bu özellik Şekil 9'da verilen ve tam yük koşullarında elde edilen deneysel verilerde de

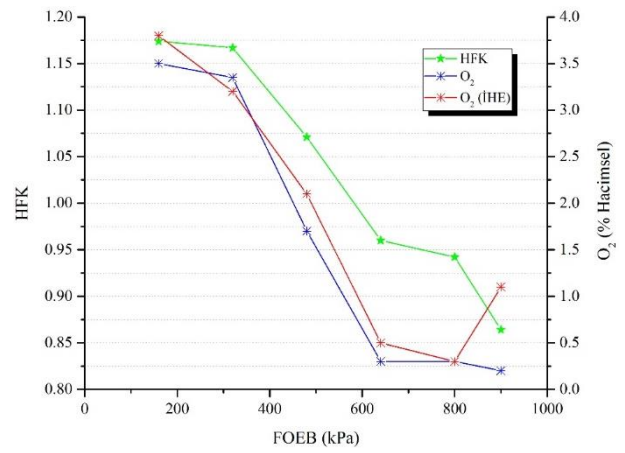
görülmektedir. Bu çalışma koşullarında bütün motor devirlerinde  $\lambda < 1$  olduğundan (motor zengin karışımla çalıştığından) İHE devre dışı iken NO için konvertör verimi %97'nin üzerinde elde edilmiştir. Oksijen konsantrasyonunun düşük olduğu bu koşullar konvertörde NO emisyonunun azaltılması için daha ideal ortamı sağlamaktadır. Bunun sonucu olarak konvertör çıkışındaki NO emisyonunun sıfır ya da sıfıra çok yakın değerler aldığı Şekil 9'da görülmektedir. İHE'nin aktifleştirilmesi durumunda da dönüştürme verimi olumsuz etkilenmemiş ve yine %97'nin üzerinde olduğu görülmüştür. İHE aktif iken devre dışı bırakıldığı durumdakine benzer şekilde konvertör sonrasındaki NO değerlerinin sıfır ya da sıfıra çok yakın olduğu Şekil 9'da görülmektedir.



**Şekil 9.** Konvertör öncesi ve sonrasında NO emisyonunun değişimi ve konvertör dönüştürme verimi (The conversion efficiency of the converter and the variation of NO emission before and after the converter)

DeneySEL çalışmanın ikinci aşamasında motor, maksimum tork devri olan 2500 rpm'de farklı motor yüklerinde çalıştırılarak deneyler gerçekleştirilmiştir. Şekil 10'da farklı motor yüklerinde motorun çalışma koşullarındaki değişim, HFK'daki değişim ile birlikte kendisini göstermektedir. 600 kPa motor yükünün altındaki KGKA'da motor, yakıt ekonomisi elde edecek şekilde stokiometrik orandan daha fakir karışımla ( $\lambda > 1$ ) çalışmaktadır. Bu yükün üzerinde ise, güç talebi olduğundan motorun zengin karışımla ( $\lambda < 1$ ) çalışmaya başladığı görülmektedir. Oksijen konsantrasyonu,

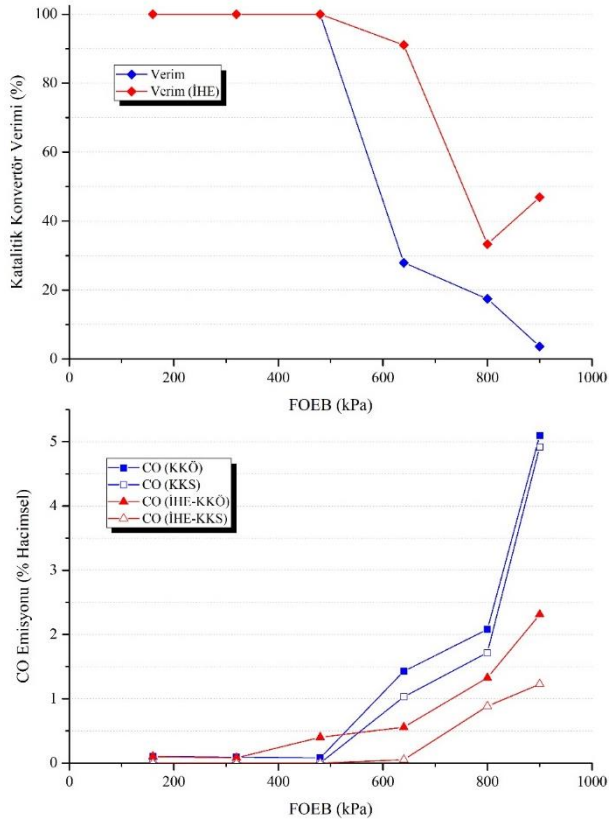
motorun bu çalışma koşullarından etkilenmekte ve  $\lambda > 1$  olduğu şartlardaki KGKA'da İHE devre dışı iken %3,5'e kadar çıkmaktadır. İHE devreye alındığında tam yük koşulları haricinde egzoz gazı içerisindeki oksijen miktarında dikkate değer bir değişim görülmemektedir. İHE, temelde egzoz sistemine ek hava sağlayan bir sistem olduğundan motorun zengin karışımla çalıştığı tam yük ya da tam yüke yakın KGKA'da verimli olmaktadır. Motorun çalışma koşullarına göre egzoz gazları içerisinde oksidasyon için yeterli oksijen olması durumunda İHE'nin gerekli olmadığı Şekil 10'da görülmektedir. İHE aktif olabilecek durumda olmasına rağmen KGKA'larda devreye girerek egzoz gazı içerisindeki oksijen miktarında önemli bir değişim sağlamamıştır. Oksijen konsantrasyonunda dikkate değer artış sadece tam yükte görülmektedir.



**Şekil 10.** Motor yüküne bağlı olarak HFK ve O<sub>2</sub> konsantrasyonunun değişimi (The variation of the relative air-fuel ratio and O<sub>2</sub> concentration depending on engine load)

Şekil 11'de 600 kPa motor yükünün altındaki KGKA'da CO emisyonu için konvertör verimi, motor stokiometrik orandan daha fakir karışımla ( $\lambda > 1$ ) çalıştığından her iki durumda da (İHE'nin devre dışı ve aktif olduğu şartlarda) aynı sonuç elde edilmiştir. Motorun bu noktadaki çalışma koşulları, konvertörde CO emisyonunun oksidasyonu için yeterli oksijen sağlamaktadır. İHE, GKA'nın daha da artırıldığı tam yükte etkili olmakta ve egzoz gazı içerisindeki oksijen miktarını etkilemektedir (Şekil 10). Bu etki Şekil 11'de görülen verimde ortaya çıkarak 600 kPa motor yükünün üzerindeki çalışma koşullarında ( $\lambda < 1$ ) verimin %91'e kadar artmasını sağlamıştır.



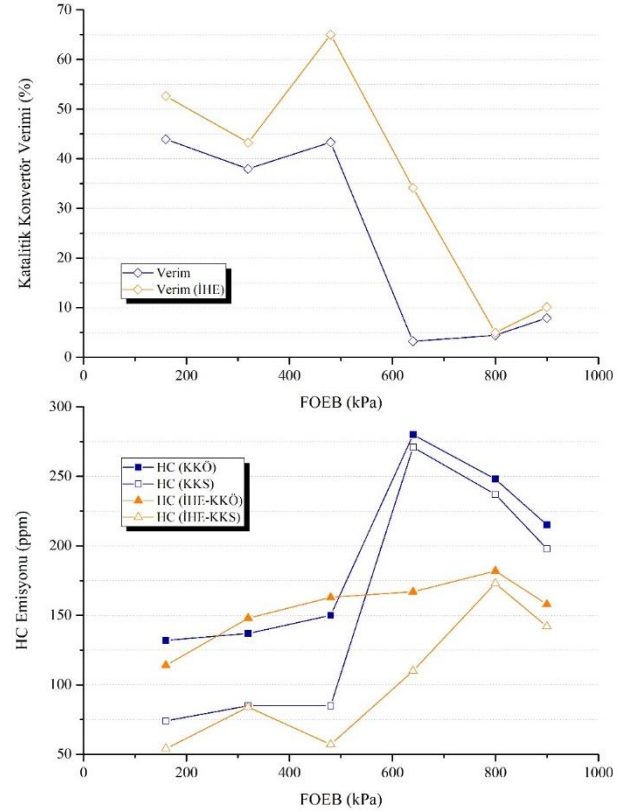


**Şekil 11.** Konvertör öncesi ve sonrasında CO emisyonunun değişimi ve konvertör dönüştürme verimi (The conversion efficiency of the converter and the variation of CO emission before and after the converter)

İHE'nin HC emisyonuna ve konvertör verimine farklı motor yüklerindeki etkisi Şekil 12'de görülmektedir. Motor yükündeki değişim Şekil 10'da görüldüğü gibi motorun çalışma şeklini dolayısıyla HFK'yı etkilediğinden Şekil 12'de verilen konvertör öncesindeki (motor çıkışı) HC emisyonunda ve konvertör veriminde  $\lambda$ 'nın 1'den büyük olduğu noktalarda fakir karışımla çalışmanın pozitif etkisi ortaya çıkmaktadır. Motorun zengin karışımla çalışmaya başladığı yüksek KGKA'da yetersiz oksijenin olumsuz etkisi verimdeki değişim ile kendini göstermektedir. 600 kPa'nın üstündeki yüklerde HC için verim %10'un altındadır. Bu durum konvertör öncesi ve sonrasında HC değerlerinin birbirine yakın olmasından kaynaklanmaktadır. Pasifleştirmenin ardından İHE egzoz manifolduna bağlanarak deneyler tekrarlandığında genel olarak veri alınan noktalarda konvertör çıkışındaki HC emisyonunun daha az olduğu ve HC emisyonunu dönüştürmede konvertörün nispeten daha etkin olduğu görülmektedir. Verilerin ortalaması dikkate alındığında verim %23,5'ten %35'e çıkmıştır.

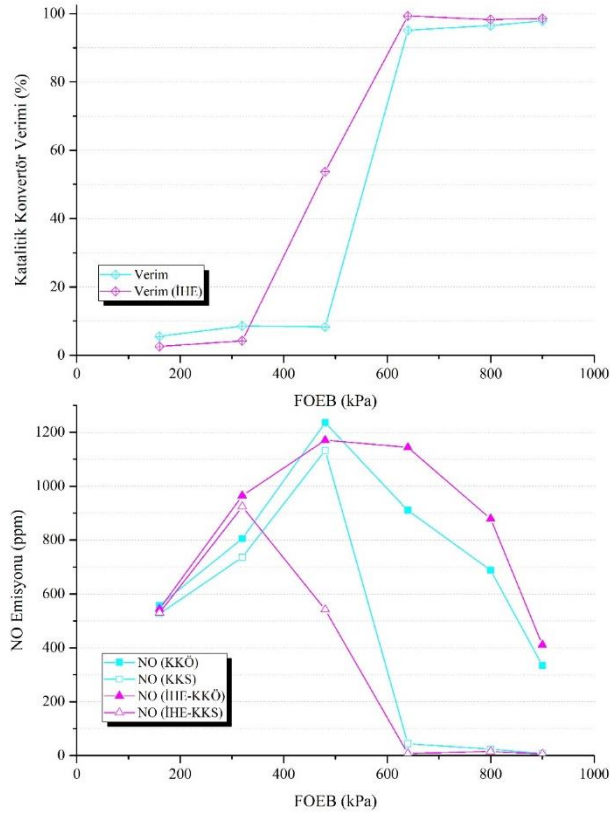
CO emisyonu üzerinde HFK'nın birincil etken olması fakir bölgede verimin %100'e kadar ulaşması desteklemektedir (Şekil 11). CO emisyonundan farklı olarak HC emisyonlarının oluşumu üzerinde temel etken H/Y oranı olsa da bunun dışında yanma odasında silindirik kapak contası, sekmanlar, supap oturma

yüzeyleri, buji ve piston tepesinde yer alan dar bölgelerde alevin ilerleyememesi ve sönmesi, yağ filmi içerisine hidrokarbon bileşenlerinin absorbe edilmesi ve geri bırakılması da HC emisyonu oluşumuna neden olmaktadır. Ayrıca katalitik konvertörde HC emisyonunun dönüştürülmesi için daha fazla aktivasyon enerjisine ihtiyaç vardır ve bazı HC bileşenleri de konvertördeki reaksiyonlara tepkisizdir [1, 3, 7, 11, 16-18].



**Şekil 12.** Konvertör öncesi ve sonrasında HC emisyonunun değişimi ve konvertör dönüştürme verimi (The conversion efficiency of the converter and the variation of HC emission before and after the converter)

Motor devrine bağlı olarak NO için elde edilen sonucun bir benzeri farklı motor yüklerinde de görülmüştür (Şekil 13). CO ve HC dönüştürme verimlerine H/Y oranının etkisinin NO emisyonunda zıt yönde olması bu sonuçta da etkin olmaktadır. 600 kPa'nın altındaki yüklerde  $\lambda$ 'nın 1'den büyük olduğu hava-yakıt karışımlarıyla motorun çalışması NO dönüşümünü olumsuz etkilemekte ve konvertör sonrasında NO emisyonunda dikkate değer bir değişim görülmemektedir. Oksijen konsantrasyonunun yüksek olduğu ortam NO emisyonunun indirgenmesi için istenen bir durum değildir. Motorun çalışma şartlarının NO dönüşümü için daha uygun olduğu (motorun zengin karışımla çalıştığı  $\lambda < 1$  olduğu) 600 kPa'nın üzerindeki motor yüklerinde verim, %95'nin üzerinde elde edilmiş ve konvertör çıkışındaki NO sifıra oldukça yaklaşmıştır. İHE devreye alındığında da verimin olumsuz etkilenmediği görülmüştür.



**Şekil 13.** Konvertör öncesi ve sonrasında NO emisyonunun değişimi ve konvertör dönüştürme verimi (The conversion efficiency of the converter and the variation of NO emission before and after the converter)

## 5. SONUÇ (CONCLUSION)

Bu çalışmada dört zamanlı, dört silindri, su soğutmalı, tek nokta yakıt enjeksiyonlu ve buji ile ateşlemeli bir motorda İHE'nin egzoz emisyonları ve katalitik konvertör verimine etkisi motor devri ve yükü esas alınarak deneysel olarak araştırılmıştır. CO, HC ve NO emisyonları genel olarak değerlendirildiğinde İHE ile en büyük iyileşme CO emisyonunda elde edilmiştir. Ancak bu iyileşme özellikle motorun zengin hava/yakıt oranlarıyla çalıştığı şartlarda söz konusudur. CO'nun ardından HC emisyonları benzer şartlarda İHE'nin sağladığı ilave hava ile azalmıştır. Deneysel verilerin alındığı şartlarda İHE'nin NO emisyonu dönüşümüne olumsuz bir etkisi veya bir katkısı görülmemiştir. Çalışmada ortaya çıkan sonuçlar:

- Port enjeksiyonlu buji ile ateşlemeli bir motorda  $\lambda < 1$  olduğu bir başka deyişle motorun zengin karışımla çalıştığı tam yük koşullarında İHE, katalitik konvertör veriminin CO ve HC emisyonları için iyileşmesini sağlarken, NO dönüşüm verimini de olumsuz etkilememiştir. İHE ile katalitik konvertör veriminde en fazla artış CO emisyonunda elde edilmiştir. Ortalama olarak %15,3'ten %65,8'e artmıştır.

- Farklı motor yüklerinde temel olarak iki farklı motor çalışma koşulu elde edilmiştir. 600 kPa motor yükünün altındaki KGKA'da motor, yakıt ekonomisi elde edecek şekilde ( $\lambda > 1$ ) ve bu yükün üzerinde tam yüke kadar olan GKA'larda ise; güç modunda ( $\lambda < 1$ ) çalışmıştır. HFK'da değişime neden olan bu çalışma koşulları hem egzoz emisyonlarında hem konvertör veriminde etkisini belirgin bir şekilde ortaya çıkarmıştır. Farklı motor yüklerinde İHE'nin etkisi de bu çalışma koşullarına (HFK değişimi) bağlı kalmıştır. İHE'nin fakir karışımla çalışmanın söz konusu olduğu motor yüklerinde devreye girmediği, tam yükün veya bir başka deyişle güç modunda etkin olduğu şartlarda ise; etkili olduğu görülmüştür. Zaten CO ve HC'nin oksidasyonu için ilave hava ihtiyacı bu çalışma koşullarında ortaya çıkmaktadır.

## KISALTMALAR (ABBREVIATIONS)

FOEB	Fren Ortalama Efektif Basıncı
GKA	Gaz Kelebek Açıklığı
HFK	Hava Fazlalık Katsayısı
H/Y	Hava/Yakıt
İHE	İkincil Hava Enjeksiyonu
KGKA	Kısmi Gaz Kelebek Açıklığı
SAI	Secondary Air Injection
SI	Spark Ignition

## ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

## YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS' CONTRIBUTIONS)

**Erdi DEMİRCİ:** Deneylerin yapılması, sonuçların analizi ve makalenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

**Tolga TOPGÜL:** Metodoloji, danışmanlık, deneylerin yapılması, sonuçların analizi ve makalenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

**Uğur ÖZEL:** Literatür araştırması ve makalenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

## ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

## KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Schäfer, F. and Basshuysen, R., "Reduced Emissions and Fuel Consumption in Automotive Engines", *Springer-Verlag*, Wien New York, (1995).

- [2] Pulkrabek, W. W., "Engineering Fundamentals of the Internal Combustion Engine", *Prentice Hall*, New Jersey, (2004).
- [3] Mondt, J. R., "Cleaner cars: The History and Technology of Emission Control since the 1960s", *Society of Automotive Engineers*, Inc. Warrendale, (2000).
- [4] Topgül, T., Yücesu, H. S., Okur, M., "Buji ile ateşlemeli bir motorda çalışma parametrelerinin egzoz emisyonlarına etkilerinin deneysel olarak incelenmesi", *Politeknik Dergisi*, 8 (1): 43-47, (2005).
- [5] Gürbüz, H. ve Akçay, İ. H., "Buji ateşlemeli hidrojen motorunda ateşleme avansı ve sıkıştırma oranının performans ve NO<sub>x</sub> emisyonuna etkisi", *Politeknik Dergisi*, 16 (1): 45-50, (2013).
- [6] Yılmaz, E., "Hekzan ve n-Heptan yakıt karışımları ile çalışan homojen dolgulu sıkıştırma ile ateşlemeli (HCCI) bir motorda hava fazlalık katsayısının yanma ve motor performansı üzerindeki etkileri", *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*, 8 (1): 26-39, (2020).
- [7] Abdel-Rahman, A. A., "On the emissions from internal-combustion engines: A review", *International Journal of Energy Research*, 22 (6): 483-513, (1998).
- [8] Alasfour, F. N., "NO<sub>x</sub> emission from a spark ignition engine using 30% iso-butanol-gasoline blend: part 1--preheating inlet air", *Applied Thermal Engineering*, 18 (5): 245-256, (1998).
- [9] Alasfour, F. N., "NO<sub>x</sub> emission from a spark ignition engine using 30% iso-butanol-gasoline blend: part 2--ignition timing", *Applied Thermal Engineering*, 18 (8): 609-618, (1998).
- [10] Bhattacharyya, S. and Das, R. K., "Catalytic control of automotive NO<sub>x</sub>: A review", *International Journal of Energy Research*, 23 (4): 351-369, (1999).
- [11] Heywood, J. B., "Internal Combustion Engine Fundamentals", *McGraw-Hill, Inc.*, New York, (1988).
- [12] Onorati, A., Ferrari, G., D'Errico, G., "Secondary air injection in the exhaust after-treatment system of SI engines: 1D Fluid dynamic modeling and experimental investigation", *SAE Technical Paper*, 2003-01-0366, (2003).
- [13] Kochs, M. W., Kloda, M., van de Venne, G., Golden, J. E., "Innovative secondary air injection systems", *SAE Technical Paper*, 2001-01-0658, (2001).
- [14] Kollmann, K., Abthoff, J., Zahn, W., Bischof, H., Göhre, J., "Secondary air injection with a new developed electrical blower for reduced exhaust emissions", *SAE Technical Paper*, 940472, (1994).
- [15] Mahadevan, G. and Subramanian, S., "Experimental investigation of cold start emission using dynamic catalytic converter with pre-catalyst and hot air injector on a multi cylinder spark ignition engine", *SAE Technical Paper*, 2017-01-2367, (2017).
- [16] Hochgreb, S., "Combustion-Related Emissions in SI Engines (chapter 6), in: Sher, E. (Edited by) Handbook of Air Pollution from Internal Combustion Engines Pollutant Formation and Control", *Academic Press*, Boston, (1998).
- [17] Yu, S. and Min, K., "Effects of the oil and liquid fuel film on hydrocarbon emissions in spark ignition engines", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 216 (9): 759-771, (2002).
- [18] Shayler, P. J., Chick, J., Darnton, N. J. and Eade, D., "Generic functions for fuel consumption and engine-out emissions of HC, CO and NO<sub>x</sub> of spark-ignition engines", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 213 (4): 365-378, (1999).