



**BUJİ İLE ATEŞLEMELİ BİR MOTORDA İKİNCİL HAVA
ENJEKSİYONUNUN EGZOZ EMİSYONLARINA ETKİSİNİN DENEYSEL
OLARAK ARAŞTIRILMASI**

Uğur ÖZEL

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
OTOMOTİV MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

TEMMUZ 2022

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

.....

Uğur ÖZEL

04/07/2022

BUJİ İLE ATEŞLEMELİ BİR MOTORDA İKİNCİL HAVA ENJEKSİYONUNUN EGZOS EMİSYONLARINA ETKİSİNİN DENEYSEL OLARAK ARAŞTIRILMASI

(Yüksek Lisans Tezi)

Uğur ÖZEL

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Temmuz 2022

ÖZET

Artan çevre kirliliği ve alınan önlemler sonucunda egzoz emisyonlarının azaltılması konusu gün geçtikçe önem kazanmaktadır. Emisyonların azaltılması için çeşitli yöntemler ve teknolojiler kullanılmaktadır. Bu kapsamda buji ile ateşlemeli motorlarda üç yollu katalitik konvertörler, EGR ve ikincil hava enjeksiyonu gibi emisyon kontrol sistemleri egzoz emisyonlarını azaltmak için etkili bir yöntem olarak kullanılmaktadır. Bu çalışmada farklı motor çalışma koşullarında egzoz emisyonlarını azaltmak ve katalitik konvertör verimini arttırmak için optimum ikincil hava enjeksiyonu miktarı araştırılmıştır. Deneyler, iki farklı motor devrinde (1750 rpm ve 3500 rpm) ve dört farklı yükte (40 Nm, 60, Nm, 80 Nm ve tam yük) gerçekleştirilmiştir. Deneylerde ikincil hava enjeksiyonunun egzoz lambdası ve katalitik konvertör verimi ile CO, HC, NO, CO₂ ve O₂ salınımları üzerindeki etkisi araştırılmıştır. İkincil hava enjeksiyonunun egzoz hattındaki termal reaksiyonlara ve katalitik konvertör içerisindeki kimyasal reaksiyonlara etkisi belirlenmeye çalışılmıştır. Çalışma sonucunda özellikle zengin hava/yakıt oranlarında optimum ikincil hava enjeksiyonu ile CO emisyonunda %98, HC emisyonunda %75 ve NO emisyonunda %69'a kadar üç emisyon da iyileşme sağlanabileceği görülmüştür.

Bilim Kodu : 93003

Anahtar Kelimeler : İkincil hava enjeksiyonu, buji ile ateşlemeli motor, egzoz emisyonları, katalitik konvertör, emisyon kontrol yöntemleri

Sayfa Adedi : 53

Danışman : Doç. Dr. Tolga TOPGÜL

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE EFFECT OF THE SECONDARY AIR INJECTION ON THE EXHAUST EMISSIONS IN A SPARK-IGNITION ENGINE

(M. Sc. Thesis)

Uğur ÖZEL

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

July 2022

ABSTRACT

As a result of increasing environmental pollution and the measures taken, the issue of reducing exhaust emissions is gaining importance day by day. Various methods and technologies are used to reduce emissions. In this context, emissions control systems such as three-way catalytic converters, EGR and secondary air injection are used as an effective method to reduce exhaust emissions in spark-ignition engines. In this study, the optimum amount of secondary air injection has been investigated to reduce exhaust emissions and increase catalytic converter efficiency at the different engine operating conditions. The experiments have been performed at two different engine speeds (1750 rpm and 3500 rpm) and four different loads (40 Nm, 60 Nm, 80 Nm and full load). The effect of the secondary air injection on the exhaust lambda, catalytic converter efficiency, CO, HC, NO, CO₂ and O₂ have been investigated in the experiments. The effect of secondary air injection on thermal reactions in the exhaust line and chemical reactions in the catalytic converter has been tried to be determined. As a result of the study, especially at rich air/fuel ratios, it has been seen that an improvement can be achieved in all three emissions, up to 98% in CO emissions, 75% in HC emissions and 69% in NO emissions with the optimum secondary air injection.

Science Code : 93003

Key Words : Secondary air injection, spark ignition engine, exhaust emissions, catalytic converter, after-treatment systems

Page Number : 53

Supervisor : Assoc. Prof. Dr. Tolga TOPGÜL

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım boyunca her zaman yanımda olarak maddi manevi desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen sevgili danışmanım Doç. Dr. Tolga TOPGÜL'e, Gazi Üniversitesi Otomotiv Mühendisliği Bölümü hocalarıma, Kocaeli Üniversitesi Otomotiv Mühendisliği Bölümü hocalarıma ve bana eğitim-öğretim hayatım boyunca hep destek olan bundan sonraki hayatımda da olacaklarına inandığım aileme çok teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	xiv
RESİMLERİN LİSTESİ.....	xvi
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xv
1. GİRİŞ.....	1
2. EGZOZ EMİSYONLARININ İNSAN SAĞLIĞI VE ÇEVRE ÜZERİNE ETKİLERİ	3
2.1. Karbon Monoksit (CO)	4
2.2. Yanmamış Hidrokarbonlar (H_xC_y).....	5
2.3. Azot Oksitler (NO_x).....	6
2.4. Aldehitler ($R.CHO$).....	7
2.5. İs Partikülleri (Katı ve sıvı parçacıklar)	7
2.6. Kükürt Dioksit (SO_2).....	8
2.7. Kurşun Bileşikleri (Pb).....	8
3. BUJİ İLE ATEŞLEMELİ MOTORLARDA EMİSYONLARLA MÜCADELE YÖNTEMLERİ	9
3.1. Birincil (Primer) Önlemler.....	9
3.2. İkincil (Sekonder) Önlemler.....	9
3.3. Üçüncül (Triyer) Önlemler.....	10
3.3.1. Termik reaktörler.....	10

	Sayfa
3.3.2. Katalitik konvertörler	11
3.3.3. Partikül filtreleri (GPF).....	14
3.3.4. İkincil hava enjeksiyonu	15
4. LİTARATÜR ÇALIŞMASI	17
5. MATERYAL VE METOT.....	25
5.1. Materyal	25
5.2. Metot	29
6. ARAŞTIRMA BULGULARI	33
6.1. Tam Yük Koşullarında Egzoz Emisyonlarındaki Değişimler	34
6.1.1. Karbon monoksit (CO)	35
6.1.2. Hidrokarbonlar (HC).....	36
6.1.3. Azot oksitler (N _x O _y).....	37
6.1.4. Karbon dioksit (CO ₂).....	38
6.1.4. Oksijen (O ₂).....	38
6.2. Tam ve Kısmi Yüklerde İHE'nin Egzoz Emisyonlarına Etkisinin Birlikte Değerlendirilmesi	39
6.2.1. Lambda (λ)	39
6.2.2. Tam yükte İHE'nin egzoz emisyonlarına etkisinin birlikte değerlendirilmesi	40
6.2.3. Kısmi yüklerde İHE'nin egzoz emisyonlarına etkisinin birlikte değerlendirilmesi	42
6.3. Optimum İHE Kullanım Oranları.....	47
7. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	49
KAYNAKLAR	51
ÖZGEÇMİŞ	53

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. Kandaki CO miktarına göre semptomlar.....	4
Çizelge 2.2. Dizel egzoz gazındaki partikül emisyonunun bileşen oranları	7
Çizelge 5.1. Test motorunun özellikleri.....	26
Çizelge 5.2. Emisyon ölçüm cihazının özellikleri ve hassasiyeti	26
Çizelge 6.1. Motor devri ve yüküne göre optimum İHE miktarları.....	47

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Karbon monoksit miktarının ve maruz kalma süresinin insan sağlığına etkisi.	5
Şekil 3.1. Termal reaktör.	11
Şekil 3.2. Hava/yakıt oranının katalitik konvertör verimine etkisi.	13
Şekil 3.3. Katalizör ile kaplanmış ve kaplanmamış partikül filtrelerinin farklı kombinasyonlarda kullanımı.	14
Şekil 3.4. İkincil hava enjeksiyonu sisteminin manifoldda konumlandırması	15
Şekil 3.5. İkincil hava enjeksiyonu sistemi bileşenleri	15
Şekil 5.1. Test düzeneği şeması	25
Şekil 6.1. İHE ile motorun tükettiği havanın oranları.....	33
Şekil 6.2. İHE miktarına bağlı olarak egzoz gazı sıcaklıkları ve lambda değerlerinin değişimleri.....	34
Şekil 6.3. 1750 ve 3500 rpm motor devirlerinde tam yükte İHE miktarına bağlı CO değerlerindeki değişimler	35
Şekil 6.4. 1750 ve 3500 rpm motor devirlerinde tam yükte İHE miktarına bağlı HC değerlerindeki değişimler	36
Şekil 6.5. 1750 ve 3500 rpm motor devirlerinde tam yükte İHE miktarına bağlı NO değerlerindeki değişimler	37
Şekil 6.6. 1750 ve 3500 rpm motor devirlerinde tam yükte İHE miktarına bağlı CO ₂ değerlerindeki değişimler	38
Şekil 6.7. 1750 ve 3500 rpm motor devirlerinde tam yükte İHE miktarına bağlı O ₂ değerlerindeki değişimler	39
Şekil 6.8. İHE miktarına bağlı egzoz lambdası değerlerindeki değişimler.....	39
Şekil 6.9. 1750 rpm motor devrinde ve tam yükte İHE miktarına bağlı egzoz emisyonlarının ve KKDV'lerin değişimi	41

Şekil	Sayfa
Şekil 6.10. 3500 rpm motor devrinde ve tam yükte İHE miktarına bağlı egzoz emisyonlarının ve KKDV'lerin değişimi.....	41
Şekil 6.11. 1750 rpm motor devrinde ve 80 Nm'lik kısmi yükte İHE miktarına bağlı egzoz emisyonlarının ve KKDV'lerin değişimi.....	42
Şekil 6.12. 3500 rpm motor devrinde ve 80 Nm'lik kısmi yükte İHE miktarına bağlı egzoz emisyonlarının ve KKDV'lerin değişimi.....	43
Şekil 6.13. 1750 rpm motor devrinde ve 60 Nm'lik kısmi yükte İHE miktarına bağlı egzoz emisyonlarının ve KKDV'lerin değişimi.....	44
Şekil 6.14. 3500 rpm motor devrinde ve 60 Nm'lik kısmi yükte İHE miktarına bağlı egzoz emisyonlarının ve KKDV'lerin değişimi.....	45
Şekil 6.15. 1750 rpm motor devrinde ve 40 Nm'lik kısmi yükte İHE miktarına bağlı egzoz emisyonlarının ve KKDV'lerin değişimi.....	46
Şekil 6.16. 3500 rpm motor devrinde ve 40 Nm'lik kısmi yükte İHE miktarına bağlı egzoz emisyonlarının ve KKDV'lerin değişimi.....	47

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 5.1. Motor, dinamometre ve test düzeneği	25
Resim 5.2. a) Emisyon ölçüm cihazı b) Cihazın bilgisayar programı.....	27
Resim 5.3. a) Sönümleyici tank ve hava akış metresi b) Hava akış metresi göstergesi ve kontrol panosu.....	27
Resim 5.4. a) Yakıt tüketimi ölçüm cihazı b) Yakıt tüketimi ölçüm cihazının sensörü.	28
Resim 5.5. a) İkincil hava debisi ölçüm cihazı b) Basınçlı sönümleme tankı.....	28
Resim 5.6. Temassız sıcaklık ölçüm cihazı	29

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler

Açıklamalar

cc	Santimetreküp
g/kWh	Gram / kilovatsaat
l	Litre
l/min	Litre / dakika
kW	Kilo Watt
NM	Newton metre
mm	Milimetre
ppm	Parts per million
rpm	Devir / dakika
vol	Volume
λ	Lambda
ρ	Yoğunluk (g/dm^3)
$^{\circ}\text{C}$	Santigrat derece

Kısaltmalar

Açıklamalar

BSCO	Fren özgül karbon monoksit
BSCO₂	Fren özgül karbon dioksit
BSHC	Fren özgül hidrokarbon
BSNO	Fren özgül azot monoksit
BSO₂	Fren özgül oksijen
c-GPF	Coated gasoline particular filter
DCCS	Dynamic catalytic converter system
İHE	İkincil hava enjeksiyonu
FTP	Federal test procedure
GDI	Gasoline direct injection

Kısaltmalar**Açıklamalar**

GPF	Gasoline particular filter
HFK	Hava Fazlalık Katsayısı
LEV	Low-emission vehicle
LPG	Liquefied petroleum gas
KK	Katalitik konvertör
KKDV	Katalitik konvertör dönüştürme verimi
PFI	Port Fuel Injection
SAI	Secondary air injection
TWC	Three way catalysts
TLEV	Transitional low-emission vehicle
ULEV	Ultra-low emissions vehicle

1. GİRİŞ

Yüzyıldan uzun bir süredir ulaşım ihtiyacımızın büyük kısmı kara taşıtları ile sağlanmakta ve enerji kaynağı olarak fosil yakıtlar tüketen içten yanmalı motorlar yaygın olarak kullanılmaktadır.

Hidrokarbon temelli yakıtların yanması sonucu ortaya çıkan zararlı egzoz emisyonları insan sağlığına zarar vermekte, iklimi etkilemekte ve havayı kirletmektedir. Bu durum devletlerin önlem amacıyla çeşitli kısıtlamalar ve standartlar getirmelerine yol açmıştır. Bu sebeple içten yanmalı motorların kullanımı azaltılmakta ve elektrikli veya hibrit motorlar gibi alternatif teknolojilere yönelim hızlanmaktadır.

Farklı enerji kaynakları kullanılmaya çalışılsa da içten yanmalı motorlar halen önemli miktarda kullanılmakta ve çeşitli taşıtlarda kullanılmaya devam edeceği öngörülmektedir. Ayrıca içten yanmalı motorlarda verimlilik ve zararlı emisyonların azaltılması konusundaki çalışmalar gün geçtikçe daha önemli hale gelmektedir [1].

İçten yanmalı motorların temel sorunlarının başında gelen egzoz emisyonlarının azaltılması için çeşitli yöntemler geliştirilmiştir. Bu yöntemler temelde üç kategoride incelenebilir. Bunlar genel olarak yakıtla yapılan müdahaleleri kapsayan birincil önlemler, silindirin içerisinde yanmaya yapılan müdahaleleri kapsayan ikincil önlemler ve yanma sonrasında egzoz gazlarına müdahaleleri kapsayan üçüncül önlemler olarak sıralanabilirler.

Üçüncül önlemler, engel olamadığımız egzoz gazlarının oluştuktan sonra bertaraf edilmesini sağlayan yöntemlerdir. Katalitik konvertörler, termal reaktörler, SCR sistemleri, partikül filtreleri, art yanma sistemleri ve ikincil hava enjeksiyonu sistemleri bu kapsamda değerlendirilebilirler.

İkincil hava enjeksiyonu, silindirin çıkışına temiz hava verilerek egzoz gazlarının hâlihazırdaki termal enerjileri ile oksitlenmelerini sağlamak için kullanılmaktadır. Ayrıca sisteme fazladan temiz hava ve dolayısı ile oksijen verildiği için katalitik konvertörün ihtiyaç duyduğu oksijeni karşılayarak verimini de yükseltmeyi amaçlamaktadır.

Literatürde katalitik konvertörün %50 dönüştürme verimine ulaşması üzerinde ikincil hava enjeksiyonunun etkileri birçok çalışmada incelenmiş ve başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Bu sayede motorun özellikle soğukta ilk çalıştırıldığında ürettiği zararlı egzoz gazları büyük ölçüde azaltılabilmektedir.

Literatürde motorun yük altında çalıştığı koşullar için ikincil hava enjeksiyonunun egzoz emisyonlarına etkisine yönelik çalışmaların sınırlı olduğu görülmektedir. Soğukta ilk hareket uygulamasına kıyasla tam yükte ve kısmi yüklerde egzoz gazı sıcaklıkları artacağı için termal oksidasyonun iyileşeceği öngörülmüştür. Bu fikirden yola çıkılarak motorun özellikle zengin karışımla çalıştığı durumlarda oluşan karbon monoksit gazının ikincil hava enjeksiyonu yardımı ile karbondioksit gazına dönüşebileceği ve ayrıca ortaya çıkan hidrokarbon partiküllerinin de oksitlenerek azalabileceği varsayımına ulaşılabılır. Egzoz sistemine sağlanan oksijen ile katalitik konvertörün düşük dönüştürme verimine sahip olduğu koşullarda verimin arttırılabileceği ve atmosfere salınan zararlı egzoz gazlarının azaltılabileceği hipotezi kurulmuştur.

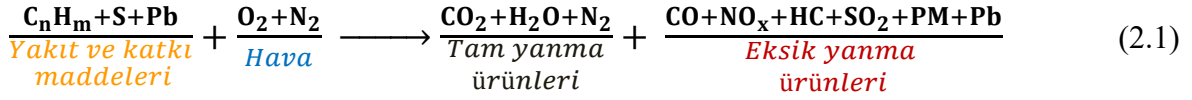
Yapılan bu çalışma ile buji ile ateşlemeli bir motorda ikincil hava kullanımının farklı motor rejimlerindeki etkisi incelenmiştir. Deneyler esnasında çeşitli motor devirleri ve yüklerinde ikincil hava enjeksiyonu debisinin değişiminin egzoz gazları ve katalitik konvertör verimi üzerindeki etkileri tespit edilmiştir. Ortaya çıkan deney sonuçlarından yola çıkılarak egzoz emisyonlarının en düşük seviyeye ulaşmaları için ikincil hava enjeksiyonunun motorun farklı çalışma şartları için hangi ölçülerde kullanılacağı belirlenmiştir.

2. EGZOZ EMİSYONLARININ İNSAN SAĞLIĞI VE ÇEVRE ÜZERİNE ETKİLERİ

Sanayi devrimi ile makineler gün geçtikçe daha fazla bağımlı olmamız ve sonrasında içten yanmalı motorların icadı sonucunda fosil yakıt kullanımı hayatımızın vazgeçilemez bir gerçeği olmuştur. Dünyada nüfusun hızlı bir şekilde artması sonucu enerji ihtiyacı daha da arttı ve daha fazla fosil yakıt kullanmaya başlandı. Tüm bunların sonucunda atmosfere salınan emisyon gazlarındaki artış hava kirliliğini tehlikeli boyutlara ulaştırmıştır [2].

Bir hidrokarbonun yanma tepkimesi sonucunda aşağıdaki bileşikler açığa çıkabilir [3];

- | | |
|--------------------------------------|---|
| 1. Karbon dioksit (CO ₂) | 2. Su buharı (H ₂ O) |
| 3. Azot (N ₂) | 4. Oksijen (O ₂) |
| 5. Azot oksitler (NO _x) | 6. Yanmamış hidrokarbonlar (H _x C _y) |
| 7. Karbon monoksit (CO) | 8. İs (Duman) (C) |



Motorlarda kullanılan benzin ve mazot gibi yakıtlar tek bir hidrokarbon türünden oluşmayıp aslında birer karışım oldukları ve çeşitli hidrokarbon gruplarını içlerinde barındırmanın yanı sıra kükürt ve fosfor gibi inorganik bileşenlere de sahip oldukları için bu maddelerin de oksitlenmesi sonucunda kükürt oksitler gibi emisyonlar da ortaya çıkabilmektedir. Emisyonlar genel olarak; yanmamış hidrokarbonlar (HC), su buharı (H₂O), azot oksitler (NO, NO₂), kükürt oksitler (SO₂, SO₃), is, duman ve partiküller, kurşun bileşikler, aldehytler (R.CHO) şeklinde sınıflandırılabilirler [2,4].

Bu emisyonlardan su buharı ve karbon dioksit hariç diğerleri insan sağlığına zararlıdır. Bununla birlikte karbon dioksit, dolaylı olarak sera gazı etkisine yol açtığı için küresel ısınmayı tetikleyerek çevreye zarar vermektedir. Fakat karbondioksit yanmanın doğal sonucu olarak oluştuğu için zararlı bir emisyon olarak görülmemektedir.

2.1 Karbon Monoksit (CO)

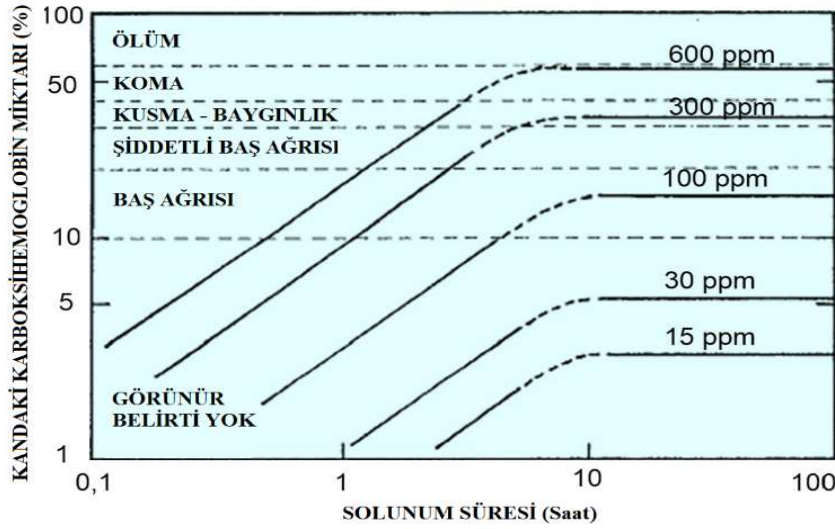
Kokusuz, renksiz ve zehirli bir gazdır. Kronik ve akut zehirlenmelere yol açmaktadır. Kandaki oksijeni taşıyan hemoglobin moleküllerine bağlanır ve kanda oksijen taşınmasını engelleyerek hücrelere oksijen gitmesini engeller. Buna bağlı olarak hücre solunumu gerçekleşmediği için zehirlenme ve boğulma meydana gelir. Karbon monoksitin hemoglobine bağlanma eğilimi oksijene oranla yaklaşık 200 kat daha fazladır.

Taşıt egzoz gazları, orman yangınları, gaz türbinleri ve metilen klorür bulunduran boyalar başta gelen karbon monoksit kaynaklarıdır [5,6].

Tanı koyulurken yapılan yanlışlıklar ve karbon monoksit zehirlenmesinin düşük sayıda gösterilmesi sebebiyle vaka sayılarının tam olarak belirlenememesine rağmen elde edilen verilere göre karbon monoksit, ölümcül zehirlenmelerin çoğunluğunda başrol oynamaktadır. Ölümle sonuçlanmayan vakalarda ise kalıcı nörolojik ve psikiyatrik hasarlar görülmektedir [7]. Soba zehirlenmelerinde de başrolü oynamaktadır. Karbon monoksit konsantrasyonunun ve solunum süresinin insan sağlığına etkileri Çizelge 2.1.'de ve Şekil 2.1'de verilmiştir.

Çizelge 2.1. Kandaki CO miktarına göre semptomlar [6]

Kandaki CO seviyesi	Semptom ve bulgular
% 0 - 10	Yok
% 10 - 20	Hafif baş ağrısı, cilt damarlarında genişleme
% 20 - 30	Baş ağrısı, şakakta zonklayıcı ağrı
% 30 - 40	Şiddetli baş ağrısı, güçsüzlük, bulantı, kusma, bulanık görme, baş dönmesi, kollaps, kırmızı-vişne rengi deri ve dudaklar
% 40 - 50	Diğerlerine ek olarak nabız ve solunum artışı
% 50- 60	Taşikardi, taşipne, Cheyne-Stokes solunumu, koma, konvülsiyon
% 60 - 70	Koma, konvülziyon, kardiyak ve solunum depresyonu, muhtemel ölüm
% 70 - 80	Zayıf nabız, deprese olmuş solunum, solunum yetmezliği ve ölüm



Şekil 2.1. Karbon monoksit miktarının ve maruz kalma süresinin insan sağlığına etkisi [2]

İçten yanmalı motorlarda karbon monoksit oluşumunun nedeni eksik veya verimsiz yanma tepkimeleridir. Zengin hava/yakıt oranı, yanmanın tamamlanması için yeterince süre olmaması, homojen olmayan yakıt-hava karışımı gibi sebeplerle yanma tepkimesinin verimsiz olması sonucunda karbon monoksit oluşmaktadır.

2.2. Yanmamış Hidrokarbonlar (H_xC_y)

Genellikle kötü kokulu ve tahriş edicilerdir. Hidrokarbonlar arasında parafinler ve olefinler solunum yollarındaki iç deriyi tahriş ederler ayrıca bayıltıcı etkileri de vardır. Aromatlar ise kanserojen maddelerdir. Kısmi yanma sonucunda oluşan aldehitlerin de keskin kokuları sebebiyle göz ve burun için rahatsız edici etkileri vardır [2,8].

Gaz fazındaki hidrokarbonlar güneş ışığı etkisiyle azot oksitler ile birleşerek fotokimyasal sis veya pus olarak bilinen sis tabakasının oluşumundan sorumludurlar. Bu sis tabakasının gözlerde yanma ve sulanma ile birlikte solunum sistemine zarar verme gibi etkileri de vardır ayrıca bitkiler için de zararlıdır [2,8].

Yakıt deposu ve karbüratörden buharlaşarak veya motordaki eksik yanmaların sonucunda atmosfere atılırlar. Yakıtın tamamen yakılmadığının göstergesidir. Düşük sıcaklıkta yanma veya yetersiz oksijen ile eksik yanma sonucunda oluşabildikleri gibi silindir içerisinde belirli bölgelerin aşırı zengin olması ya da aşırı fakir kalması durumunda ve alev cephesinin ulaşamadığı bölgelerde de oluşabilmektedirler [2,8].

2.3. Azot Oksitler (NO_x)

Azot ile oksijenin oluşturduğu NO , NO_2 , N_2O_2 gibi bileşiklerin tümü azot oksitler olarak adlandırılırlar ve NO_x şeklinde ifade edilirler. NO renksiz ve kokusuz bir gazdır ve felç edici özelliğe sahiptir. NO_2 ise kırmızı-kahverengidir, kötü kokuludur ve tahriş edici özelliği vardır [2,4].

Azot oksitler, karbon monoksitte olduğu gibi kandaki hemoglobine karışma etkilerinin yanı sıra daha tehlikeli olarak ciğerlerdeki su molekülleri ile birleşerek nitrik asit oluştururlar. Asit miktarının azlığı nedeni ile kısa sürede etki göstermezken birikmesi sonucunda uzun vadede özellikle de üst solunum yolu hastaları için tehlikelidir. Azot oksitlerin su ile birleşerek nitrik asit oluşturmaları asit yağmurlarına da sebep olarak bitki örtüsüne ve çevreye zarar vermektedir. Ayrıca çevre için bir diğer sorun ise azot oksitlerin sebep olduğu kimyasal sistir [2,4,8].

Havanın içerisindeki azotun (N_2) yanma tepkimesine girmesi beklenmez fakat $1600\text{ }^\circ\text{C}$ üzerindeki sıcaklıklarda azot, oksijen ile tepkimeye girmeye başlamaktadır ve ana eleman NO olmak üzere azot oksitler oluşmaktadır. Bu durum daha yüksek sıkıştırma oranı ve bunun sonucunda oluşan daha yüksek silindir içi sıcaklıklar nedeniyle sıkıştırma ile ateşlemeli motorlarda buji ile ateşlemeli motorlara kıyasla daha yaygın görülmektedir. Yanma sırasında oluşan NO_x 'lerin devir ve motor yüküne bağlı olarak değişmekle birlikte ortalama olarak %85'ini NO , %15'ini ise NO_2 oluşturmaktadır. Egzoz gazları atmosfere atıldıktan sonra ise bir miktar NO , NO_2 'ye dönüşmektedir [8].

NO_x oluşumunu etkileyen bir diğer parametre ise HFK'dır (hava fazlalık katsayısı). 1,1 HFK civarında azot oksit oluşumu maksimum düzeydedir. Daha fakir karışımlarda havaya oranla az yakıt olduğu için silindir içi sıcaklığın düşmesi, daha zengin karışımlarda ise yakıtın yanması sonucu azot ile tepkimeye girecek oksijenin azlığı sebebiyle azot oksit oluşumu azalmaktadır.

2.4. Aldehitler (R.CHO)

Hidrokarbonların kısmi oksidasyonları sonucu oluşurlar. Düşük sıcaklıkların sebep olduğu eksik veya tamamlanamayan yanma reaksiyonları başlıca oluşum sebepleridir. Genellikle formaldehit (CH_2O) ve akrolein ($\text{C}_3\text{H}_4\text{O}$) olarak görülürler. Dizel egzoz gazlarının kötü kokmasının ve gözler ile solunum sistemini tahriş etmesinin büyük oranda sorumlusu formaldehittir [2,4].

2.5. İs Partikülleri (Katı ve sıvı parçacıklar)

Egzoz emisyonları içerisindeki katı maddelerin çoğunu özellikle dizel motorlarda oluşan yanmamış karbon yani is oluşturmaktadır. İs parçacıklarının yani karbon tanelerinin doğrudan insan sağlığına bir zararı bulunamamıştır fakat beraberinde taşıdığı kanserojen maddeler dolayısı ile insan sağlığına zararlı bir hale dönüşmektedirler. İs parçacıkları beraberinde farklı zararlı bileşenleri de taşıyarak solunum yolunda zamanla birikmekte ve tehlike oluşturmaktadır [2,4].

İs dışında egzozdan atılan diğer partikülleri karbon-hidrojen zincirleri oluşturmaktadır. Bu zincirler yanmamış hidrokarbonlar, oksitlenmiş hidrokarbonlar, polinükleer aromatikler, kükürt dioksit, azot oksit ve sülfürik asit gibi organik ve inorganik bileşikler barındırmaktadırlar. Dizel egzoz gazının bileşenleri Çizelge 2.2. ile verilmiştir.

Çizelge 2.2. Dizel egzoz gazındaki partikül emisyonunun bileşen oranları [2]

Partikül Bileşeni	Partikül maddelerin oranları (% Ağırlık)
Katı parçacıklar	66 - 82
Sıvı yakıt ve organik bileşenleri	11 - 15
Motor yağı ve organik bileşenleri	9 - 11
Kükürt bileşenleri ve su	1 - 11

Hidrojenin oksijen ile tepkimeye girmesi karbonun oksijen ile tepkimeye girmesinden daha kolaydır. Bu yüzden öncelikle yakıt içerisindeki hidrojenler yanmaktadır. Yanma esnasında oksijen öncelikli olarak hidrojen tarafından kullanıldığı için oksijen azlığı durumunda karbon atomları tepkimeye girecek oksijen bulamazlar ve yanmadan egzozdan dışarıya atılırlar. Bu durumu oksijen eksikliği tetiklediği gibi yeterince iyi karışmamış hava-yakıt karışımı da tetiklemektedir. Bu yüzden is, dizel motorlarda daha çok görülmektedir ve bunu önlemek için dizel motorlar her zaman stokiometrik oranın üzerinde HFK ile çalışırlar (genellikle 20g hava / 1 gram yakıt oranının altına düşmezler). İs oluşumu dizel motorlar için karışımın oranını belirlemede sınır olarak kullanılmaktadır [8].

2.6. Kükürt Dioksit (SO₂)

Renksiz ve sert kokulu bir gazdır. Solunum yolları, akciğer ve karaciğer hastalıklarına neden olmaktadır. Kükürt, yakıtların içerisinde bulunmaktadır ve bu yolla yanma tepkimesine girmektedir. Özellikle dizel motorlarda yanma sonucunda SO₂ oluşmaktadır. Oluşan SO₂ atmosferde su buharı ile birleşip sülfürik asit oluşturarak asit yağmurlarına sebep olmaktadır. Bu durum hem insan sağlığını hem de çevreyi tehdit etmektedir. [2,4,8].

2.7. Kurşun Bileşikleri (Pb)

Benzinin oktan sayısını arttırmak için içerisine eklenen kurşun tetraetil gibi maddeler yanma sonucunda egzozdan kurşun ve kurşun bromür gibi bileşenlerin doğaya salınmasına yol açmaktadır. Bu bileşikler solunum, bitkiler, hayvansal gıdalar veya sular gibi doğrudan veya dolaylı yollar ile insan vücuduna girmektedir ve burada zamanla birikmektedir. Kurşun çok zehirli bir maddedir. Metabolizma ve beyin üzerinde de etkileri vardır [2,4].

3. BUJİ İLE ATEŞLEMELİ MOTORLARDA EMİSYON KONTROL YÖNTEMLERİ

Taşıtlarda egzoz emisyonlarını önlemeye yönelik uygulamalar; birincil önlemler, ikincil önlemler ve üçüncül önlemler olarak adlandırılan üç ayrı başlık altında gruplandırılırlar [2].

3.1. Birincil Önlemler

Emisyonu meydana getiren kaynak silindir içerisindeki yanmadır ve bu sebeple yanma gerçekleşmeden önce emisyonu önlemek için alınan bu önlemlere kaynak öncesi önlemler de denir. Temelde yakıtın iyileştirilmesine yönelik işlemler bu başlık altında değerlendirilmektedir.

Benzin içerisine kurşun içeren katkıların kullanımından vazgeçilmesi, oksijen içeren etanol ve metanol gibi alkol katkıları ile emisyonlarda iyileşmelerin sağlanmaya çalışılması, benzini oluşturan hidrokarbonların oranlarını düzenleyen standartlar getirilmesi gibi çalışmalar birincil emisyon önleme yöntemleri olarak değerlendirilirler. Dizel yakıtlarında yakıttan kükürttün ve fosforun uzaklaştırılması işlemleri de yine kaynak öncesi önlemlere verilebilecek bir örnektir. Ayrıca LPG, doğal gaz, hidrojen, alkoller gibi alternatif yakıtların kullanımları da birer emisyon önleme tekniği olarak değerlendirilebilirler. [2]

3.2. İkincil Önlemler

Emisyon oluşumuna kaynağında yapılan müdahalelerdir. Örnek olarak buharlaşan çığ hidrokarbonların kaynağı yakıt tankıdır ve bu sebeple yakıtın buharlaşarak atmosfere karışmasını önleyen karbon kanister sistemi kaynağında emisyonu müdahale kapsamında değerlendirilmektedir.

İçten yanmalı bir motoru düşündüğümüzde kaynak silindir içerisindeki yanma olduğundan yanmayı etkileyen motor parametreleri ve sistemlerine yapılan müdahaleler ikincil önlemler başlığı altına değerlendirilebilirler [2].

İkincil önlem olarak değerlendirilebilecek emisyon kontrol yöntemlerine verilebilecek örnekler şunlardır: dur-kalk sistemleri, yanma odası tasarımı, literatürde RCCI ve HCCI olarak ifade edilen çift yakıt veya hibrit yanma modları teknolojilerinin içten yanmalı motorlarda kullanımı, karter havalandırması, benzin motorlarında direkt enjeksiyon sistemleri, karbon kanisteri ve depo havalandırması, EGR (egzoz gazı resirkülasyonu) sistemi, aşırı doldurma ve ara soğutma sistemleri, yakıt hava oranına yapılan müdahaleler ile gelişmiş enjektör teknolojileri vb.

3.3. Üçüncül Önlemler

Birincil ve ikincil önlemler uygulanmasına rağmen oluşumuna engel olunamayan emisyonların egzoz gazı içerisinde ayrıştırılarak, filtrelenerek veya başka bir maddeye dönüşümü sağlanarak temizlenmesini kapsayan yöntemlerdir. Kaynak sonrası yöntemler olarak da adlandırılırlar.

Bu tezde incelenecek olan ikincil hava enjeksiyonu sistemi ve katalitik konvertöre etkisi uygulamaları da üçüncül önlemler içerisinde yer almaktadırlar [2].

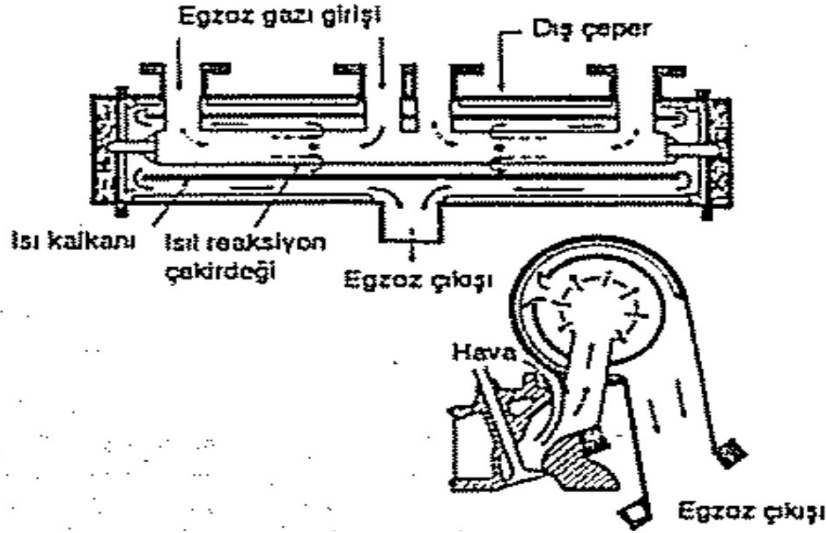
Başlıca uygulamaları; katalitik konvertörler, partikül filtreleri, termik reaktör ve ikincil hava enjeksiyonu olarak sıralanabilir.

3.3.1. Termal reaktörler

Egzoz gazı içerisindeki eksik yanma ürünlerini yani HC ve CO emisyonlarını tekrar yakarak atmosfere karışmalarını önleyen sistemdir. Isıtılmış bir oda içerisine alınan CO ve HC parçacıkları bir süre burada bekletilir ve sisteme ilave hava verilerek gerekli oksijen sağlanmış olur. Oda içerisinde bekleyen CO ve HC yakılarak bir başka deyişle okside edilerek CO₂ ve H₂O'ya dönüştürülmektedir.

Egzoz gazı sıcaklığı rölantide 300-400 °C, nadiren yüksek yüklerde ise 900 °C civarına ulaşmasına rağmen ortalama 400-600 °C aralığında olmaktadır. Hidrokarbonları oksitleyebilmek için 600 °C, karbon monoksiti oksitleyebilmek için ise 700 °C sıcaklığa ihtiyaç duyulmaktadır. Bu şartların sağlanması zor olduğundan daha düşük sıcaklıklarda

katalitik oksidasyon ile bu dönüşümleri yapan katalitik konvertör sistemleri 1990'lı yıllardan itibaren 1970'li yıllarda yaygın olarak kullanılan termal reaktörlerin yerini tamamen almıştır [2,4,8].



Şekil 3.1. Termal reaktör [2]

3.3.2. Katalitik konvertörler

HC ve CO moleküllerini termal oksidasyon yerine daha az sıcaklık gerektiren katalitik oksidasyon metodu ile okside etmeye yarayan sistemlerdir. Temelde çalışma prensipleri oksidasyon tepkimesini hızlandıracak ve oksidasyon için gereken şartları kolaylaştıracak katalizörler kullanarak molekülleri okside etmektir. Katalitik konvertörler yardımı ile karbondioksit ve hidrokarbonların oksidasyonları 700 °C yerine 250 °C gibi daha düşük sıcaklıklarda yapılabilmektedir.

Azot oksit emisyonlarının azaltılması ise termal oksidasyon ile mümkün olamamaktadır. Ancak HC ve CO'nun katalitik oksidasyonları ile gerçekleşen indirgeme reaksiyonları ve katalizör kullanımı yardımı ile NO_x emisyonlarının azaltılması mümkündür. CO, HC ve NO_x indirgeme ve oksidasyon işlemlerini yaparak üç emisyonu da azaltabilen 3 yollu katalitik konvertörler bu sebeplerden dolayı benzin motorlarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Katalitik konvertörlerin çalışmaları ile ilgili reaksiyonlar aşağıda verilmiştir [2,4,8,9,10].

Oksidasyon tepkimeleri;



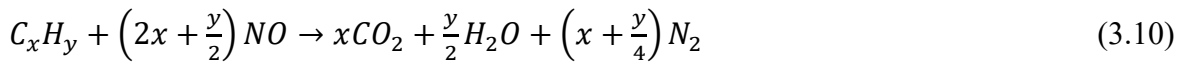
Buhar yapılandırması;



Zeldovich mekanizması;



NO_x indirgemesi;

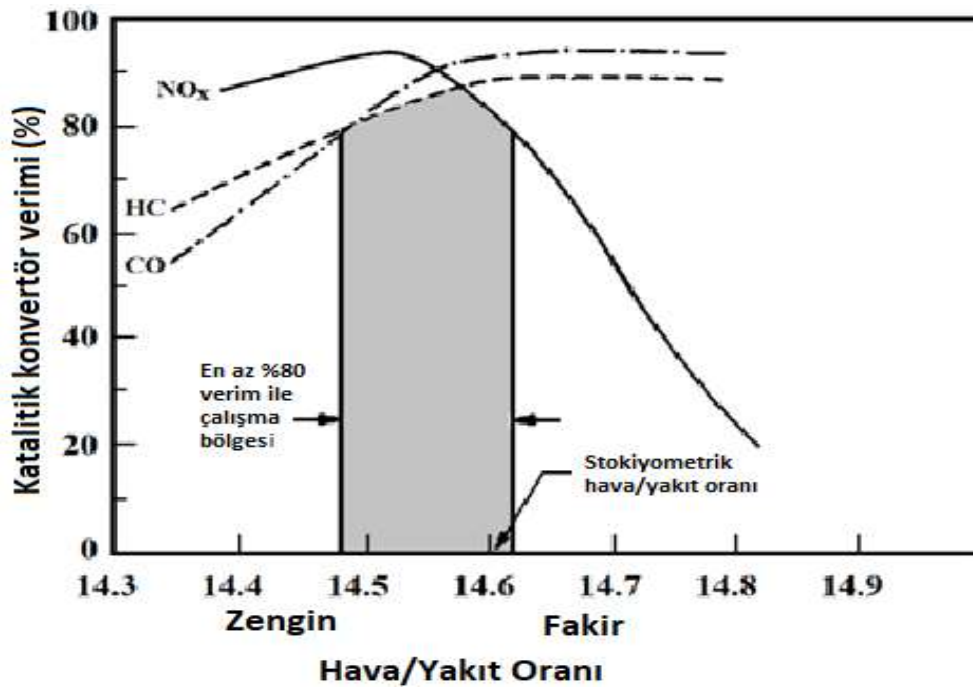


Su-gaz dönüşümü;



Katalitik Konvertör Dönüştürme Verimi (KKDV)

Katalitik konvertörlerde verim, emisyonun dönüştürülme yüzdesini ifade etmektedir. Dönüştürülen emisyon miktarının ilk girişteki emisyon miktarına bölünmesi ile hesaplanmaktadır. Konvertörlerin verimini etkileyen en önemli parametre hava-yakıt oranı yani konvertöre giren oksijenin miktarıdır, bunun dışında emisyonların oranları ve sıcaklık etki eden diğer parametrelerdir. Katalitik konvertör veriminin Hava/yakıt oranı ile değişimi Şekil 3.2.'da görülmektedir.



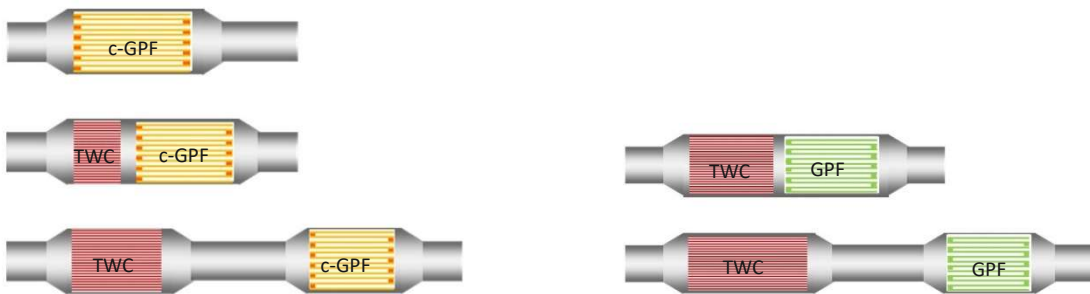
Şekil 3.1. Hava/yakıt oranının katalitik konvertör verimine etkisi [10]

Katalitik konvertörün çalışmaya başlaması, emisyonları dönüştürme miktarının %50'ye ulaşması olarak kabul edilmektedir [11]. Genellikle konvertör sıcaklığı 250-300 °C arası bir değerde iken KKDV %50 seviyesine ulaşmaktadır. %50 KKDV'nin sağlandığı sıcaklık katalitik konvertörün yapısına, motorun yapısına ve çalışma şartlarına göre değişebilmektedir. Örnek olarak Mahadevan ve Sendilvelan yaptıkları çalışmada 1817 cc 4 silindirli benzinli bir motorda; CO için %50 KKDV noktasını 286 °C, HC için ise 323 °C olarak tespit etmişlerdir [12]. Mianzarasvand ve arkadaşları ise deneylerinde kullandıkları bir motosiklet motoru için 117 °C sıcaklığın yeterli olduğuna karar vermişlerdir [13].

3.3.3. Partikül filtreleri (GPF)

Direkt enjeksiyonlu benzin (GDI) motorları, silindire doğrudan yakıt enjeksiyonu ile motor vuruntu riskini azaltarak ve daha yüksek sıkıştırma oranlarında çalışmayı sağlayarak geleneksel port enjeksiyonlu motorlara (PFI) göre daha iyi yakıt ekonomisi sunmaktadırlar. Az yakıt tüketmeye bağlı olarak emisyonlarda azalma sağlamasına rağmen dizel motorlara benzer şekilde karışım hazırlama için yetersiz zaman olması ve nispeten daha soğuk yanma odası yüzeylerine yakıt çarpması sonucunda yakıt açısından zengin yanma cepleri oluşumuna sebep olarak partikül oluşumuna uygun ortamlara yol açar. Bu oluşan partikülleri azaltmak için yakıt özelliklerini iyileştirme ve silindir içerisinde alınan önlemlerin yanı sıra partikül filtrelerinin kullanılması da girerek yaygınlaşmaktadır [14].

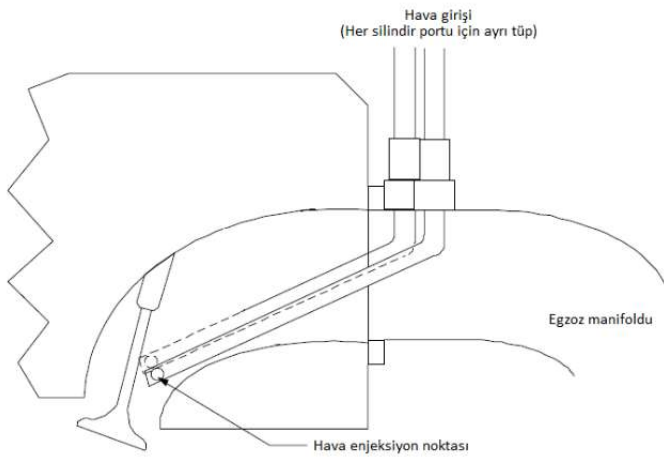
Filtrenin tıkanması konusundaki aktif temizle sistemleri hakkında araştırmalar devam etmekle birlikte biriken kurumun dizellerdeki kadar çok olmaması ve benzinli motorların yüksek devir ve stokiyometrik yanma sebebiyle daha sıcak egzoz gazı dışarıya atması sayesinde aktif bir temizleme teknolojisine gerek olmadığını gösteren çalışmalar da mevcuttur [14]. Bir çalışmada ise, yüksek O₂ konsantrasyonu ve düşük akış hızı ile karakterize edilen yakıt kesme uygulamasın oksidasyona sebep olacağını ve motordan gelen kurum ile oksitlenen kurum arasında bir dengeye ulaşılabileceği gösterilmiştir [15]. GPF temelde iki türde kullanılmaktadırlar. Sadece filtreleme görevi olan filtreler katalitik konvertörün yanında ek bir sistem olarak kullanılmaktadırlar. Üç yollu bir katalitik konvertörde bulunan ve katalizör görevi gören metallerle kaplanan filtreler ise hem partikül filtresi görevi görmekte hem de katalitik konvertör tepkimelerini meydana getirerek emisyon dönüşümü sağlayabilmektedirler. Şekil 3.2.'de katalizörler ile kaplanmış (c-GPF) ve kaplanmamış (GPF) filtreler için farklı şekillerde kullanım örnekleri bulunmaktadır [14].



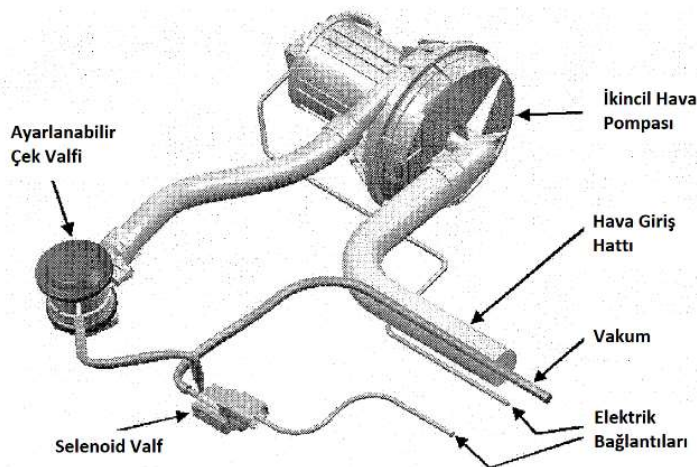
Şekil 3.2. Katalizör ile kaplanmış ve kaplanmamış partikül filtrelerinin farklı kombinasyonlarda kullanımı [14]

3.3.4. İkincil hava enjeksiyonu

Termik reaktörler ile hedeflenen HC ve CO emisyonlarının egzoz sistemi içerisinde oksitlenmesi için geliştirilen daha güncel bir sistemdir. İlave olarak egzoz sistemine verilen havayı bir nozul yardımıyla egzoz sıcaklığının en yüksek olduğu yer olan supap arkasına vererek ortamda eksik olan oksijeni sağlamayı amaçlamaktadır. Havayı sağlamak için; motorun emme zamanında oluşturduğu emme manifoldundaki basınç farkını kullanan diyaframlı pompalar, mekanik tahrikli hava pompaları veya elektrikli pompalar kullanılabilir [16].



Şekil 3.3. İkincil hava enjektörlerinin manifoldda konumlandırması [17]



Şekil 3.4. İkincil hava enjeksiyonu sistemi bileşenleri [16]

İkincil hava enjeksiyonu uygulaması, sağladığı oksijen ile katalitik konvertör öncesi termal oksidasyonu sağlayarak katalitik konvertörün yükünü azaltmayı hedeflemektedir. Ayrıca katalitik konvertörün ihtiyaç duyduğu oksijeni bulamadığı zamanlarda da oksijen ihtiyacını karşılayarak konvertör dönüştürme verimini arttırmaktadır [18].

Katalitik konvertörler genellikle NO_x bileşenlerinden oksijeni ayırarak HC ve CO moleküllerini oksitlerler. Dışarıdan verilen oksijen kullanıldığında bazı durumlarda NO bileşenlerindeki oksijene ihtiyaç duyulmadığı için ikincil hava enjeksiyonunun NO_x emisyonu üzerinde olumsuz etkisi olabilmektedir.

İkincil hava enjeksiyonu yaygın olarak egzoz sisteminde oksijene en çok ihtiyaç duyulan yani en zengin motor lambdası ile çalışan soğukta ilk hareket zamanında kullanılmaktadır. Katalitik konvertörün %50 KKDV'nin sağlandığı sıcaklığı düşürüp daha kısa sürede ulaşmasını sağlayarak soğukta ilk hareket rejiminde atmosfere atılan emisyonları azaltmaktadır.

Mevcut uygulamalarda soğukta ilk harekette kullanılan bu sistem, farklı şekillerde ve kombinasyonlarda denenmektedir. Sistemin etkinliğini belirleyen parametreler; enjeksiyon noktası, enjekte edilen havanın sıcaklığı, ikincil havanın debisi, katalitik konvertörün konumu ve motorun çalışma rejimidir.

4. LİTERATÜR ÇALIŞMASI

Lee ve Heywood [19], bir SI motora ikincil hava enjeksiyonu uygulaması yaparak soğukta ilk çalıştırma sırasında egzoz emisyonları ve %50 KKDV'ye ulaşma sıcaklığı üzerindeki etkilerini deneysel olarak incelemişlerdir. Deneylerde ikincil hava enjeksiyonunun egzoz gazının karışması, ısı kaybı, termal oksidasyon ve katalitik oksidasyon süreçleri üzerindeki etkilerinin gözlemlenmesi amacıyla ateşlemenin rötara alınması, yakıt zenginleştirme, ikincil havanın enjeksiyon konumu ve debisi gibi çeşitli motor çalışma parametreleri ve ikincil hava enjeksiyon stratejilerini denemişlerdir.

Çalışmada katalitik konvertörün öncesinde İHE ile termal oksidasyon sağlanarak kayda değer düzeyde emisyon azalımı elde edilebildiğini ortaya koymuşlardır. Oksidasyon sebebiyle daha yüksek egzoz gazı sıcaklıklarına ulaşılmış ve bu sayede %50 KKDV sağlanan sıcaklığa daha hızlı ulaşarak katalizör içindeki kimyasal reaksiyonlar iyileştirilmiştir. 1,2 λ ile çalışan motorda %100 İHE uygulanması %50 KKDV'ye ulaşılmasını 4,2 saniyede sağlayarak en hızlı sonucu vermiştir. İHE sisteminin kullanılması ile KKDV'yi HC emisyonları için %46'dan % 88'e ve CO emisyonları için %37'den %93'e yükseltmişlerdir.

Çalışmada ikincil hava enjeksiyon yerinin egzoz supabına yakınlaştırılmasının termal oksidasyonları iyileştirdiğini tespit etmişler ve bu sayede ikincil havanın soğutma etkisinin de azaltılabileceğini belirlemişlerdir.

Deneysel verilerin analizi, katalizör sonrası HC emisyonlarının 1,3 genel egzoz lambdasını sağlayan ikincil hava debisinde minimum seviyeye ulaştığını göstermiştir. Fakat katalizör sonrası HC emisyon seviyelerinin, ikincil hava ile egzoz gazı karıştırma oranlarından güçlü bir şekilde etkilenmediğini belirtmişlerdir.

Artan egzoz gazı sıcaklıkları ve İHE ile artan kütsel debiden kaynaklanan daha yüksek ısı transfer kayıplarına rağmen HC, CO ve H₂'nin İHE ile arttırılan termal oksidasyonları ile ortaya çıkan kimyasal enerji ile egzoz gaz sıcaklığının korunduğunu tespit etmişlerdir. Bunun sonucu olarak silindir çıkışından katalizör önüne kadar olan bölümde ısı kaybının motor lambdası ve ikincil hava debisine duyarlı olmadığını ifade etmişlerdir.

Ayrıca çalışma sonucunda İHE kullanılarak soğukta ilk çalıştırma işlemi sırasında egzoz sistemindeki yanma süreci desteklenerek silindir çıkışlı egzoz gazı kimyasal enerjisinin %90'ından fazlasının da serbest bırakılmasının sağlanabileceğini belirtmişlerdir.

Borland ve Zhao [17], yaptıkları çalışmada %50 KKDV'ye ulaşma süresini düşürmek, konvertör girişindeki emisyonları azaltmak ve ikincil hava enjeksiyonunu etkileyen parametrelerin eşzamanlı faydasını en üst düzeye çıkarmak amacıyla termal ve kimyasal oksidasyon süreçlerini araştırmışlardır. Çalışmada ikincil hava enjeksiyonunun yerinin ve yönünün, egzoz manifoldu tasarımının, kıvılcım geciktirme stratejisinin, hava/yakıt oranının ve ikincil hava debisinin oksidasyon süreçlerine etkilerini incelemişlerdir.

Çalışma Daimler Chrysler Corporation marka 2,4 litre dört silindirli motor üzerinde gerçekleştirilmiş ve soğukta ilk çalıştırma koşulları için FTP-75 (Amerikan standart test çevrimi) standartları dikkate alınmıştır. Çalışmada İHE uygulaması ile %50 KKDV'ye ulaşma süresinin azaltılabileceğini tespit etmişler ve termal oksidasyonun İHE ile arttığını belirlemişlerdir.

İkincil hava enjektörünün silindir çıkışına yaklaştırılmasının, egzoz sıcaklığı daha yüksek olduğu için termal oksidasyonu arttırdığını tespit etmişlerdir. İkincil havanın sprey şeklinde püskürtülmesi ve egzoz gaz akışına dik şekilde verilmesinin, ikincil hava ile egzoz gazının karışmasını hızlandırdığı için termal oksidasyonu arttırdığını da gözlemlemişlerdir.

Çalışmada ayrıca ateşleme avansının azaltılmasının egzoz gazı sıcaklığını artırarak termal oksidasyonları iyileştirdiğini gözlemlemişlerdir. Ateşlemenin geciktirilmesi termal oksidasyonu arttırdığı ve egzoz gaz sıcaklığını yükselttiği için %50 KKDV'ye ulaşma süresini de kısaltmıştır.

Çalışmada egzoz manifoldunun tasarımı ile ilgili egzoz gazının manifold içerisinde kalma süresi ve karışımın oluşumu olmak üzere iki temel parametre üzerinde durmuşlardır. Daha geniş hacme sahip egzoz manifoldu hem akış hızını yavaşlatıp manifoldda kalma süresini arttırarak termal reaksiyonlar için daha fazla zaman sağlamış ve egzoz gazı sıcaklığını arttırmış hem de manifold yüzeyine yakın yerlerde görülen reaksiyon sönümlenmesi durumunu azaltmıştır. Daha kısa olan ve kardeş silindirleri aynı kanalda birleştiren tasarım ise daha iyi bir karışım sağlayarak termal reaksiyonları arttırmıştır.

Egzoz lambdasının etkisinin ölçülmesi için ikincil havanın enjeksiyon konumu ve debisi sabit tutularak motor lambdasını değiştirmişlerdir. Motor lambdasının değişmesi egzoz lambdasını da değiştirmiştir. Egzoz lambdası azaldıkça egzoz ve katalizör sıcaklıklarının doğrusal olarak arttığını belirlemişlerdir. Motor lambdası azalmasının egzozda sıcaklık artışını sağlayacak daha fazla reaktan meydana çıkmasını tetiklediğini belirtmişlerdir. Egzoz lambdası 1,25 iken optimum reaktan miktarına ulaşmışlardır. Daha fakir karışımlarda enjekte edilen havaya yetecek kadar reaktan üretilmediğini, daha zengin karışımlarda ise artan HC miktarının oksidasyon sürecini etkisi altına alıp baskıladığını belirlemişlerdir.

İkincil hava debisinin etkisinin görülmesi için egzoz gazı lambdası 1,25'e sabitlenecek şekilde farklı debilerde ikincil hava vermişlerdir. İkincil hava debisi arttıkça HC miktarının azalmaya devam ettiği gözlemlenmiştir. İHE debisini arttırdıkça egzoz lambdasını sabit tutmak için motor lambdasını zenginleştirmişlerdir. HC konsantrasyonunun azalma eğiliminin, motorda tekleme görülecek noktaya ulaşılana kadar motor lambdasının düşürülmesi boyunca devam edeceği kanaatine varmışlardır.

Son, Kim ve Lee [20] yürüttükleri çalışmada, Amerikan emisyon standartlarında LEV ve ULEV (düşük emisyonlu araç ve ultra düşük emisyonlu araç) olarak tanımlanan emisyon sınıflarının koşulları ikincil hava enjeksiyonu ve fakir hava/yakıt oranı stratejisi ile sağlanabilir mi sorusuna yanıt aramışlar ve iki yöntemi kendi aralarında karşılaştırmışlardır. Çalışmalarında 2,0 litre benzinli bir motor için şehir içi standart sürüş simülasyonu olan ve soğukta ilk hareketi de kapsayan FTP75 (Federal Test Procedure) modellemesini kullanmışlardır.

Çalışmada zamana bağlı egzoz emisyon değerleri ve egzoz gaz sıcaklıkları katalitik konvertör öncesinde ve katalitik konvertörün ısı merkezinde ölçülerek incelenmiştir. Ayrıca yeni bir katalitik konvertör ile 80 000 km yaşlandırılmış bir katalitik konvertör üzerindeki etkiler incelenerek katalitik konvertör yaşlanmasının ikincil hava enjeksiyonu ve fakir hava/yakıt oranı stratejisi üzerindeki etkilerini belirlemişlerdir.

Deneyler sonucunda TLEV (Transitional low-emission vehicle) standardını karşılayan orijinal ECU stratejisi kullanıldığında 130 l/min ikincil hava ile HC emisyonunda %51 azalma ayrıca NO_x emisyonlarında %64 artış gözlemlenmiştir.

İlk 40 saniye için LEV standardına modifiye edilmiş olan ECU stratejisi ile fakir hava/yakıt oranı denendiğinde ise HC emisyonunda azalma gözlemlenerek ULEV'in %79'una kadar düştüğü belirlenmiştir. NO_x değerlerinde ise artma görülmüş fakat ULEV standardının %64'ü seviyesinde kaldığı için standart karşılanmıştır.

İlk 40 saniye için LEV standardına modifiye edilmiş olan ECU stratejisi ile zengin hava/yakıt oranı ve 130 l/min ikincil hava beraber denendiğinde ise HC emisyonu azalmış ve ULEV'in %79'u seviyelerinde standartlara uygunluk karşılanmıştır. NO_x değerlerinde ise ciddi miktarda artma görülerek ULEV standardının %90'ı seviyesine ulaşılmış ve neredeyse standardı karşılayamama noktasına gelmiştir.

Çalışmanın sonucunda İkincil hava enjeksiyonu ile karşılaştırıldığında fakir hava/yakıt oranı stratejisinin maliyet, uygulama kolaylığı ve emisyon açısından daha verimli ve yeterli olduğunu belirlemişlerdir.

Demirci [21] tarafından yapılan yüksek lisans çalışmasında buji ile ateşlemeli bir motorda kurşunsuz benzin, LPG ve etanol yakıtlarının farklı motor çalışma şartlarında ve rejimlerinde motorun performansına, egzoz emisyonlarına ve katalitik konvertör verimine etkileri incelenmiştir. Ayrıca çalışmada sadece kurşunsuz benzin ile tam ve kısmi motor yükleri şartlarında gerçekleştirilen deneylerde egzoz emisyonlarına ve katalitik konvertör verimine etkisini incelemek için ikincil hava enjeksiyonu uygulaması da test edilmiştir.

İkincil hava enjeksiyonu deneyleri sabit ikincil hava debisi ve tam yükte devre bağlı olarak incelendiğinde özellikle düşük devirlerde oksijen miktarında büyük miktarda artış olduğu gözlemlenmiştir. Katalitik konvertör öncesinde CO emisyonunda %29,3 azalma, HC emisyonunda ise %23,4 azalma meydana gelmiştir. Katalitik konvertör sonrasında ise CO emisyonunda %71 ve HC emisyonunda ise %30,7 azalma gözlemlenerek ikincil hava enjeksiyonunun katalitik konvertörün verimini arttırdığı sonucuna ulaşılmıştır. NO_x değerleri üzerinde ise bir etki gözlemlenmemiştir.

İkincil hava enjeksiyonu deneyleri sabit ikincil hava debisi ile 1500 rpm ve 2500 rpm için çeşitli motor yüklerinde incelenerek kısmi yüklerde İHE sisteminin etkisi belirlenmiştir. Deneylerde; 1500 rpm için katalitik konvertör öncesinde CO için %10,3 azalma HC için ise %28,5 azalma meydana gelmiştir. Katalitik konvertör sonrasında CO için %79,9 azalma HC

için ise %50 azalma meydana gelmiştir. NO emisyonu için ise katalitik konvertör dönüştürme veriminin %85,5 değerinden %24,3 değerine düştüğü belirlenmiştir.

2500 rpm için CO değerlerinde kayda değer derecede fark görülmemiş, HC emisyonları için ise düşük yüklerde azalma görülmesine rağmen yüksek yüklerde İHE'nun etkisi azalmıştır. Çalışmanın sonucunda motorun zengin karışımla çalıştığı tam yükte ve tam yüke yakın olan yüksek yüklerde katalitik konvertör dönüştürme veriminin İHE uygulaması ile CO için %58,2'den %78,5'e, HC için %23,5'den %35'e, NO için ise %52'den %59,4'e yükseldiği görülmüştür.

Mahadevan ve Subramanian [12], soğukta ilk hareket emisyonlarının azaltılması için %50 KKDV'ye ulaşma süresini kısaltmak amacıyla sıcak ikincil hava, katalitik konvertörün uzaklığının değiştirilmesi ve ön katalizör kullanımı stratejilerini denemiştir.

DCCS (Dinamik Katalitik Konvertör Sistemi): %50 KKDV'nin sağlandığı sıcaklığına erken ulaşmak için katalitik konvertörü motorun egzoz çıkışına kademeli olarak yaklaştırarak daha sıcak egzoz gazına maruz bırakmak yoluyla katalitik konvertörü hızlıca ısıtmaya çalışmışlardır. 600 °C civarında sıcaklığa maruz kalan konvertörün termal bozunmaya uğraması ve katalizör yaşlanmasının hızlanması bu yöntemin bir dezavantajıdır. Bu yüzden tasarladıkları sistem vasıtası ile katalitik konvertörü; soğukta ilk hareket esnasında motora yakın, %50 KKDV'ye ulaşıldıktan sonra ise geleneksel uzaklıkta tutmuşlardır.

Tasarımda 150 mm boyunda 6 adet borudan oluşan teleskobik bir sistem kullanılmıştır. Katalitik konvertör konumu 150 mm ile 900 mm arasında 150 mm'lik adımlarla %50 KKDV'ye her ulaşıldığında arttırılmıştır. 900 mm uzaklığa erişildiğinde katalitik konvertör yaşlanmaya maruz kalmayacağı geleneksel konumuna ulaşmış olmaktadır.

Tüm deneyleri 1500 rpm'de yüksüz şekilde gerçekleştirmişlerdir. Katalizör sıcaklığını, giriş ve çıkıştaki CO ve HC miktarlarını ve egzoz gaz sıcaklıklarını ölçülmüşlerdir. 36 °C ortam sıcaklığında gerçekleştirdikleri testte %50 KKDV'ye erişme süresi CO için 900 mm konumunda 109 saniye iken 150 mm'de 44 saniye, HC için ise 900 mm'de 117 saniye iken 150 mm'de 52 saniye olarak ölçülmüşlerdir.

%40 ve %20 Hacimli Ön Katalizörler: Katalitik konvertör sıcaklıklarını 150 mm mesafede yüksüz şartlarda ve 180 saniye sonunda; ön katalizörsüz durumda, ana katalitik konvertörün %40 hacmine sahip ön katalizörün kullanıldığı durumda ve %20 hacimli diğer bir ön katalizörün kullanıldığı durumda sırasıyla 516 °C, 573 °C, ve 604 °C olarak ölçülmüşlerdir. Ön katalizörün sağladığı oksidasyon sonrasında ana katalizörün sıcaklığının arttığını belirlemişlerdir. CO için %40 ön konvertör ile %50 KKDV'ye ulaşma süresinin ön katalizörsüz duruma kıyasla 44 saniyeden 35 saniyeye düşerek %22 azaldığı, %20 ön katalizörlü durumda ise 25 saniyeye düşerek %45 azaldığını gözlemlemişlerdir. HC için %50 KKDV'ye ulaşma sürelerini ise ön katalizörsüz durumda 52 saniye, %40 ön katalizörlü durumda 40 saniye, %20 ön katalizörlü durumda ise 36 saniye olarak ölçülmüşlerdir.

Sıcak İkincil Hava Enjeksiyonu: 80 °C'de 20 litre/dakika hava veren sıcak hava enjektörü ile yapılan soğukta ilk hareket deneylerinde ilk 20 saniye boyunca sıcak ikincil hava verilmiştir. Sıcak hava, egzoz gazının sıcaklığını arttırmış ve CO ile HC'nin oksidasyonuna yardımcı olmuştur. CO için %50 KKDV'ye ulaşma süresini 44 saniyeden 12 saniyeye indirerek %73 azalma göstermiştir. 900 mm mesafede yirminci saniyede dönüşüm %60 iken 150 mm'de %90 olarak ölçülmüş ve katalitik konvertör egzozla yaklaştıkça %50 KKDV'ye ulaşma süresinin azaldığı belirlenmiştir. HC dönüşümünde ise %50 KKDV'ye ulaşma süresinin 150 mm mesafede 52 saniyeden 15 saniyeye düşerek %70 azaldığı saptanmıştır.

Deneyler boyunca bütün şartlarda CO için %50 KKDV'ye ulaşma süresinin HC'dan daha az olduğunu gözlemlemişlerdir. Bu durumun sebebi olarak %50 KKDV'nin sağlandığı sıcaklığın CO için 286 °C, HC için ise 323 °C olarak ölçülmesinden yola çıkılarak hidrokarbonların katalitik oksidasyon için daha fazla sıcaklığa ihtiyaç duymasını göstermişlerdir.

Sonuç olarak sıcak hava enjeksiyonu diğer sistemlere kıyasla en kısa %50 KKDV'ye erişim süresini sağlamıştır. CO emisyonu için normal sistemden %67, %40 hacimdeki ön katalizörlü sistemden %60, %20 hacimli ön katalizörden ise %33 daha az sürede %50 KKDV sağlamıştır. HC emisyonları için ise yine aynı sırayla %63, %57 ve %53 daha az sürede %50 KKDV'yi sağlamıştır. Tam yüke geçildiğinde ise %50 KKDV'ye ulaşma süresi CO için 12 saniyeden 10 saniyeye, HC için ise 15 saniyeden 13 saniyeye düşmüştür.

Kollmann ve arkadaşları [18], yürüttükleri çalışmada soğukta ilk hareket sürecinde Mercedes-Benz'in C-Serisi'nde (C280 için sıralı 6 silindirli M104 motor) kullanılmak üzere elektrikli ikincil hava enjeksiyonu sistemi tasarlamışlar ve testlerini yapmışlardır. Bu sayede hacim, maliyet ve ağırlık iyileştirmeleri yaparak ikincil hava enjeksiyonunun daha yaygın kullanımını sağlamayı hedeflemişlerdir. Tasarımı optimize etmek için çeşitli parametreler üzerinde çalışmışlardır.

Hava miktarı: Motorun zengin karışımla çalıştığı soğukta ilk hareket sürecinde konvertör öncesinde ekzotermik reaksiyonların oluşması için hava miktarının artırılması gerektiğini fakat hava miktarını arttırdıkça da egzoz gazının soğuduğunu belirtmişler ve optimum hava debisi için denemeler yapmışlardır. İkincil hava sebebiyle soğuyan egzoz gazının gerçekleşen ekzotermik reaksiyonlar sayesinde tekrar ısınacağını bildirmişlerdir.

Deneyler yapılırken soğukta ilk hareket şartlarının tekrarlanabilirliği çok zor olduğu için kararlı rejimde 2000 rpm hızda çalışan bir motorda 0,9 motor lambdasını sabit tutarak ikincil hava miktarını ve dolayısı ile egzoz lambdasını değiştirmişlerdir. Egzoz lambdası 1,28 iken HC emisyonlarında %32 azalma olduğunu belirlemişlerdir. %50 KKDV'ye ulaşmak için gereken sıcaklığının ise egzoz lambdası 0,98 civarından 1,2'ye doğru yaklaştığında HC için 330 °C'den 280 °C'ye, CO için ise 300 °C'den 220 °C'ye düştüğünü belirtmişlerdir.

Enjeksiyon noktası: En iyi sonucun egzoz gazının en sıcak olduğu yere yani egzoz valfinin hemen arkasına ikincil hava enjekte etmekle sağlanacağını ve egzoz valfinden uzaklaştıkça ikincil havanın HC emisyonları üzerindeki etkisinin %60'tan daha fazla seviyede azalacağını göstermişlerdir.

Hava enjeksiyon sisteminin parçaları: Pozitif yer değiştirme prensipli bir makine tasarımı ile radyal fanlı bir turbo şarj tasarımı arasında değerlendirmeler yapmışlardır. Akış sürekliliği ve kararlılığı, gürültü, ağırlık, parça sayısı ve maliyet açısından daha elverişli olduğu için radyal kanatlı hava pompasını kullanmaya karar vermişlerdir.

Radyal kanatlı turbo şarj makinesi üzerinde akustik iyileştirme, geriye doğru akışın önlenmesi ve akış verimini iyileştirme amacıyla aerodinamik iyileştirmeler yapmışlardır. Mekanik tahrik yerine elektrik ile tahrik etmeye karar vermişler ve hâlihazırda kullanılan mekanik tahrikli pompanın tam gaz keleşbeği açıklındaki motor devri ne bağlı hava debisi

diyagramından yararlanarak yeni tasarlanan elektrik tahrikli pompanın devir ve debi gereksinimlerini belirlemişlerdir. Ellerindeki verilerle yola çıkarak ve çeşitli ek analizler yaparak kanat geometrisi, dc sürücü ve pompa muhafazasını iyileştirmişler ve üç kademeli elektrikli bir hava pompası tasarlamışlardır. Sistemin giriş filtresi ve susturucusu, pompası, kontrol valfi, enjeksiyon borusunun yeri ve ECU tasarımlarına karar vererek ve sistemi üretmişlerdir.

Sistemin Çalışması: Sistem motor sıcaklığına bağlı olarak 60 ile 120 saniye arası bir süre boyunca çalışmaktadır. Hava/yakıt oranı kontrolü aktif olduktan sonra sistem devre dışı bırakılır. İkincil hava valfi sadece sistem çalışırken açılır ve sistem çalışmıyorken kapanarak egzoz gazının sistemden dışarıya kaçmasını önler.

İkincil hava enjeksiyonlu sistem, hava enjeksiyonu olmayan sisteme göre ilk 20 saniye boyunca katalitik konvertör öncesi sıcaklığı 20 °C arttırmayı başarmış, devamındaki 60 saniye boyunca ise pek bir sıcaklık farkı oluşmamıştır. CO için %50 KKDV'ye erişme süresini ise 100 saniyeden 40 saniyeye düşürmeyi başarmıştır. HC için ise 120 saniyeden 50 saniyeye düşürmeyi başarmış ve 20. ve 40. saniyeler arası HC miktarınca ciddi miktarda düşüş sağlamıştır. %50 KKDV sağlanana kadar atmosfere salınan HC miktarında %53, CO miktarında ise %75 düşüş olduğunu belirtmişlerdir.

Önceki mekanik sistemle karşılaştırıldığında elektrikli hava enjeksiyon sistemi ile hem ağırlık hem de maliyet açısından %30'dan fazla kazanım sağlamışlardır. Ayrıca 18 000 rpm ile çalışması rağmen daha sessiz çalışmasını sağlamışlardır. İkincil hava enjeksiyonu sistemlerinin geliştirilmeye ve yaygın kullanıma açık sistemler olacağına dair öngöründe bulunmuşlardır.

Deneylerde fabrika çıkışı standart olarak ikincil hava enjeksiyon sistemine sahip olan Ford MVH 416 MPI marka dört zamanlı, dört silindirli, su soğutmalı, buji ile ateşlemeli ve çok nokta yakıt enjeksiyon sistemine sahip motor kullanılmıştır. Çizelge 5.1.'de motorun teknik özellikleri verilmiştir.

Çizelge 5.1. Test motorunun özellikleri

Test Motoru	Ford MVH 416 MPI Benzin Motoru
Silindir Sayısı	4 Silindir
Çap X Kurs	76 X 88 mm
Toplam Süpürme Hacmi	1,597 L
Supap Yapısı	DOHC 16 V
Sıkıştırma Oranı	10,3:1
Maksimum Motor Torku	138 Nm (3500 rpm)
Maksimum Motor Gücü	66 kW (5250 rpm)

Egzoz emisyonlarının ölçümü için bilgisayar destekli Bosch BEA 060 model egzoz emisyon ölçüm cihazı ve cihazın kendi bilgisayar yazılımı olan BEA-PC UNI V1.30 programı kullanılmıştır.

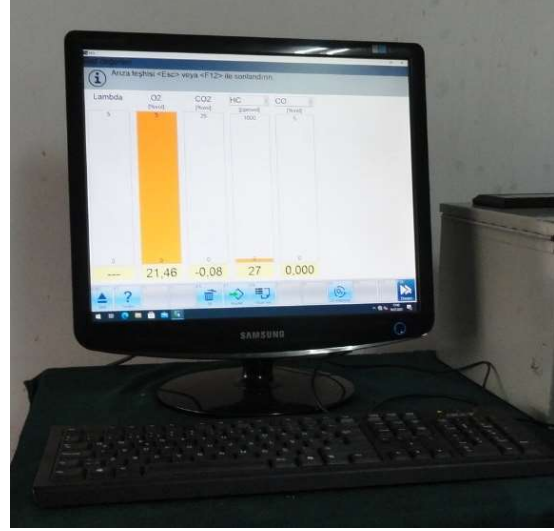
Çizelge 5.2. Emisyon ölçüm cihazının özellikleri ve hassasiyeti

Ölçülen Birim	Ölçüm Aralığı	Ölçüm Hassasiyeti
CO (vol.%)	0 - 10	0,001 vol.%
HC (ppm)	0 - 9999	1 ppm
NO (ppm)	0 - 5000	1 ppm
O ₂ (vol.%)	0 - 22	0,01 vol.%
CO ₂ (vol.%)	0 - 18	0,01 vol.%
Lambda	0,5 - 1,8	0,001

a)



b)



Resim 5.2. a) Emisyon ölçüm cihazı b) Cihazın bilgisayar programı

Motorun hava tüketiminin ölçümünde basınç dalgalanmalarını sönümleyen hava tankına bağlanan Meriam Z50MC2-4F model laminar akış metre kullanılmıştır. Bu akış metre yardımı ile hava yoğunluğu da ölçülmüştür.

a)



b)



Resim 5.3. a) Sönümleyici tank ve hava akış metresi b) Hava akış metresi göstergesi ve kontrol panosu

Yakıt tüketimi, Okuda-Koki marka FC-9521 model yakıt tüketimi ölçüm cihazı kullanılarak hacimsel olarak ölçülmüştür.

a)



b)



Resim 5.4. a) Yakıt tüketimi ölçüm cihazı b) Yakıt tüketimi ölçüm cihazının sensörü

İkincil hava enjeksiyonunun debisini ölçmek için 0-250 l/min ölçüm aralığına sahip Cole-Parmer marka bir akış ölçer kullanılmıştır. Şebeke basıncındaki dalgalanmaların sönümlemek amacıyla sönümleyici bir basınçlı hava tankı kullanılmıştır.

a)



b)



Resim 5.5. a) İkincil hava debisi ölçüm cihazı b) Basınçlı sönümleme tankı

Mevcut motor üzerindeki ikincil hava enjeksiyon sisteminin debisine müdahale edilemediği için sistem modifiye edilmiştir. İkincil hava ihtiyacı laboratuvar şebekesinden sağlanmıştır.

Gaz akış metresinin önüne bağlanan ve basınçlı tanka eklenen ayar vanaları yardımıyla ikincil havanın debisi ayarlanmıştır.

Katalitik konvertörün sıcaklığı ölçümleri Extech Instruments 42512 model kızılötesi çift lazerli termometre ile yapılmıştır.



Resim 5.3. Temassız sıcaklık ölçüm cihazı

5.2. Metot

Deneysel çalışmalarda ölçüm işleminden önce motor soğutma suyunun sıcaklığı, motor yağının sıcaklığı, motor devri, motor torku, dinamometre sıcaklığı ve egzoz gaz sıcaklığı değerlerinin normal çalışma değerlerine ulaşması ve kararlı hale gelmeleri sağlanmıştır. Ölçüm yapılacak olan egzoz emisyon ölçüm cihazı, motor hava tüketimi ölçümü cihazı, ikincil hava debi ölçüm cihazı ve yakıt tüketimi ölçüm cihazlarının kalibrasyonları yapılmıştır. Ayrıca motor hava tüketimi ölçümü cihazının verileri orifisetre ve eğik manometreden alınan değerlerle doğrulanmış, yakıt tüketimi ölçüm cihazının ölçümleri ise elektronik bir terazi yardımı ile doğrulanmıştır.

Standart şartlardaki motor momentini bulmak için, TS 1231'de [22] belirtilen esaslara uygun olarak dinamometre ile ölçülen motor momenti Eş. 5.1'de verilen düzeltme faktörü ile çarpılarak Eş. 5.2'deki denklem kullanılmıştır.

$$K_d = \left(\frac{99}{P}\right)^{1,2} \cdot \left(\frac{T + 273}{298}\right)^{0,6} \quad (5.1)$$

$$M_m = K_d \cdot M_{\delta} \quad (5.2)$$

Eşitlik 5.1.'de ve 5.2.'da yer alan;

K_d : Düzeltme faktörü

P : Atmosferik basınç (kPa)

T : Çevre sıcaklığı (°C) ifade etmektedir

M_{δ} : Deney esnasında ölçülen motor momenti (Nm)

M_m : Standart koşullardaki motor momenti (Nm)'dir.

Efektif motor gücü kW olarak Eş. 5.3 ile hesaplanmıştır. Bu eşitlikte yer alan “n” motor devrini ifade etmekte olup, birimi rpm'dir.

$$P_e = \frac{2\pi \cdot n \cdot M_m}{60 \cdot 1000} \quad (5.3)$$

Eşitlik 5.3.'de yer alan;

P_e : Motor gücü (kW)

n : Motor devri (rpm)'dir.

Yakıt tüketimi, “litre/dakika” olarak ölçülmüş ve yakıt yoğunluğu kullanılarak Eş. 5.4 ile “g/h” cinsinden hesaplanmıştır. Daha sonra fren özgül yakıt tüketimini bulmak için Eş. 5.5'deki denklem kullanılmıştır.

$$\dot{m}_{yakıt_{kütlesel}} = \dot{m}_{yakıt_{hacimsel}} \cdot \rho_{yakıt} \quad (5.4)$$

$$f_{öyt} = \frac{\dot{m}_{kütlesel}}{P_e} \quad (5.5)$$

Motor hava tüketimi, hacimsel olarak “litre/dakika” cinsinden ölçülmüş ve ölçülen hava yoğunluğu kullanılarak Eş. 5.6'daki denklem ile kütleli debi olarak “g/h” cinsinden hesaplanmıştır.

$$\dot{m}_{hava_{kütlesel}} = \dot{m}_{hava_{hacimsel}} \cdot \rho_{hava} \quad (5.6)$$

Motorun kütleli hava/yakıt oranını hesaplamak için, motorun tükettiği hava debisi ile yakıt debisi Eş. 5.7 kullanılarak oranlanmıştır. Motorun hava fazlalık katsayısı (λ) ise Eş. 5.8 ile gerçek hava/yakıt oranının stokiyometrik hava/yakıt oranına bölünmesi ile hesaplanmıştır.

$$\frac{\text{Hava}}{\text{Yakıt}} = \frac{\dot{m}_{\text{hava}}}{\dot{m}_{\text{yakıt}}} \quad (5.7)$$

$$\lambda = \frac{H/Y_{\text{gerçek}}}{(H/Y)_{\text{stokiyometrik}}} \quad (5.8)$$

Egzoz hava yakıt oranı, motora alınan hava ($\dot{m}_{\text{hava}}$) ve ikincil hava enjeksiyonu ile egzoz verilen hava miktarlarının ($\dot{m}_{\text{ihe}}$) toplamının yakıt miktarına ($\dot{m}_{\text{yakıt}}$) oranlanması ile hesaplanmıştır. Egzoz lambdası da egzoz hava/yakıt oranının stokiyometrik hava/yakıt oranına bölünmesi ile hesaplanmıştır [19].

$$\frac{\text{Hava}}{\text{Yakıt}_{\text{Egzoz}}} = \frac{\dot{m}_{\text{hava}} + \dot{m}_{\text{ihe}}}{\dot{m}_{\text{yakıt}}} \quad (5.9)$$

$$\lambda_{\text{egzoz}} = \frac{H/Y_{\text{egzoz}}}{(H/Y)_{\text{stokiyometrik}}} \quad (5.10)$$

Emisyon değişimlerinin daha doğru yorumlanması amacıyla ölçümlerden elde edilen veriler literatürde kullanılan [23-25] ve Eş. 5.11'de verilen eşitlik aracılığıyla özgül emisyonlara dönüştürülmüştür. Araştırma sonucunda elde edilen bulgular belirlenen özgül emisyon değerleri üzerinden incelenmiştir. Eşitlikte yer alan FÖE değeri her bir emisyon için ayrı ayrı hesaplanmış ve grafiklerde BSCO, BSHC, BSNO ve BSCO2 olarak ifade edilmiştir.

$$FÖE = ÖE \times \left(\frac{M}{M_{\text{Egzoz}}} \times \frac{\dot{m}_{\text{Egzoz}}}{P_e} \right) \quad (5.11)$$

Eşitlik 5.11.'de yer alan; FÖE fren özgül emisyonu (g/kWh), ÖE ölçülen emisyonu (Hacimsel olarak ppm veya %), M moleküler ağırlığı (g/mol), M_{Egzoz} egzoz gazının moleküler ağırlığını (g/mol), $\dot{m}_{\text{Egzoz}}$ egzoz gazının kütleli debisini (g/h) ve P_e motor gücünü (kW) ifade etmektedir.

$$bsHC = \frac{HC}{10^6} \cdot \frac{13,01864}{28,9647} \cdot \frac{\dot{m}_{hava} + \dot{m}_{ihe} + \dot{m}_{yakıt}}{P_e} \quad (5.12)$$

$$bsCO = \frac{CO}{100} \cdot \frac{28,0101}{28,9647} \cdot \frac{\dot{m}_{hava} + \dot{m}_{ihe} + \dot{m}_{yakıt}}{P_e} \quad (5.13)$$

$$bsCO_2 = \frac{CO_2}{100} \cdot \frac{44,0095}{28,9647} \cdot \frac{\dot{m}_{hava} + \dot{m}_{ihe} + \dot{m}_{yakıt}}{P_e} \quad (5.14)$$

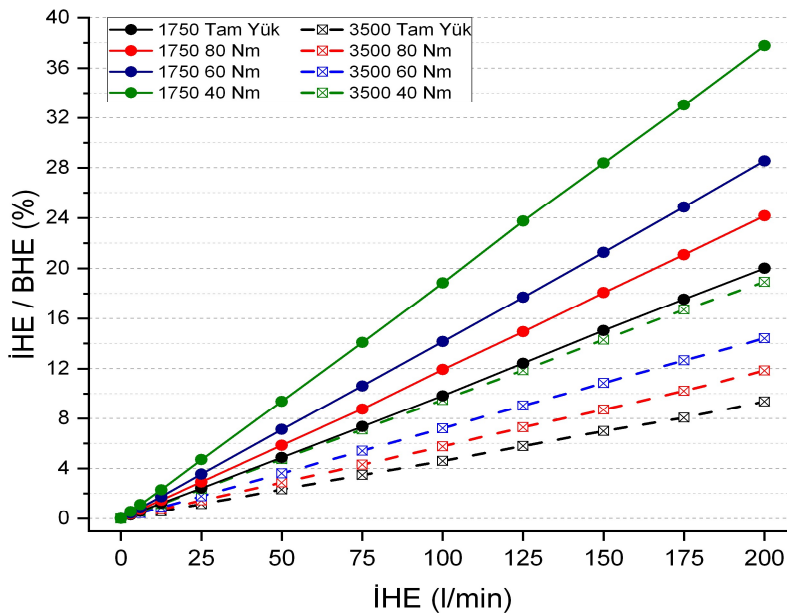
$$bsNO = \frac{NO}{10^6} \cdot \frac{30,0061}{28,9647} \cdot \frac{\dot{m}_{hava} + \dot{m}_{ihe} + \dot{m}_{yakıt}}{P_e} \quad (5.15)$$

$$bsO_2 = \frac{O_2}{10^6} \cdot \frac{31,9988}{28,9647} \cdot \frac{\dot{m}_{hava} + \dot{m}_{ihe} + \dot{m}_{yakıt}}{P_e} \quad (5.16)$$

6. ARAŞTIRMA BULGULARI

Yapılan çalışmada ikincil hava enjeksiyonu kullanılarak buji ile ateşlemeli bir motordan kaynaklanan egzoz emisyonlarının kontrolü amaçlanmıştır. Bu nedenle deneylerde çeşitli motor işletme koşullarında temel değişken olarak ikincil hava enjeksiyon miktarı dikkate alınmıştır. İkincil hava enjeksiyonu 0, 3, 6, 12,5, 25, 50, 75, 100, 125, 150, 175 ve 200 l/min debilerinde uygulanmıştır. Deneyler iki farklı motor devrinde (1750 rpm ve 3500 rpm) ve her bir motor devri için dört farklı yükte (tam yük, 80 Nm, 60 Nm ve 40 Nm) gerçekleştirilmiştir. Deneyler esnasında ölçülen motor performans parametreleri ve egzoz emisyon değerleri kullanılarak özgül emisyonlar ve katalitik konvertör verimleri belirlenmiştir.

Şekil 6.1.'de İHE ile motorun tükettiği havanın (BHE) birbirine oranı verilmiştir. İHE/BHE oranının özellikle 1750 rpm motor devrinde ve düşük kısmi motor yüklerinde oldukça yüksek seviyeler kadar ulaştığı görülmektedir. Temel parametre olarak ele alınan İHE miktarı deneysel çalışmadaki tüm şartlar dikkate alınarak ihtiyacın üzerinde olacak şekilde belirlenmiştir. Araştırmanın temel hedefi çeşitli motor çalışma koşullarında CO, HC ve NO emisyonlarının her üçünü de mümkün olduğunca birlikte azaltacak optimum İHE miktarını belirlemektir. Bu nedenle deneylerde İHE debi aralığı geniş tutulmuştur.

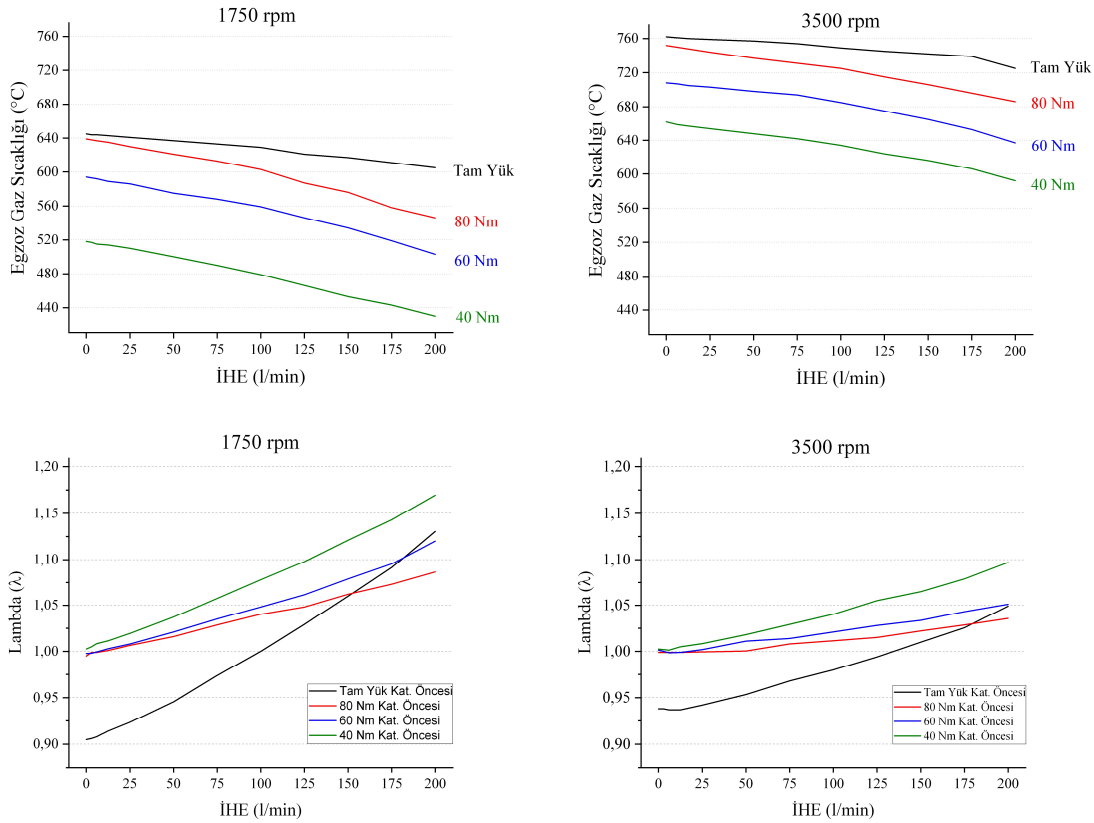


Şekil 6.1. İHE ile motorun tükettiği havanın oranları

6.1. Tam Yük koşullarında Egzoz Emisyonlarındaki Değişimler

Şekil 6.2’de 1750 rpm ve 3500 rpm motor devirlerinde yapılan deneylerde egzoz manifoldundaki egzoz gazı sıcaklıkları ve lambda değerleri verilmiştir. Egzoz gaz sıcaklıkları, egzoz manifoldunda ikincil hava enjektörlerinin hemen ardında yer alan ve dört silindirden gelen egzoz gazlarının birleştiği noktadan ölçülmüştür. Uygulanan İHE miktarı arttıkça, katalitik konvertör öncesindeki egzoz hattı boyunca egzoz gaz sıcaklığı düşmüş, egzoz gazının lambda değeri ise yükselmiştir. İHE ile kullanılan havanın sıcaklığının çevre sıcaklığında olması egzoz gaz sıcaklığının azalmasında etkili olduğu ifade edilebilir. Egzoz gazının lambda değeri ise esasen bir oksijen takviyesi olan İHE nedeniyle artış göstermiştir.

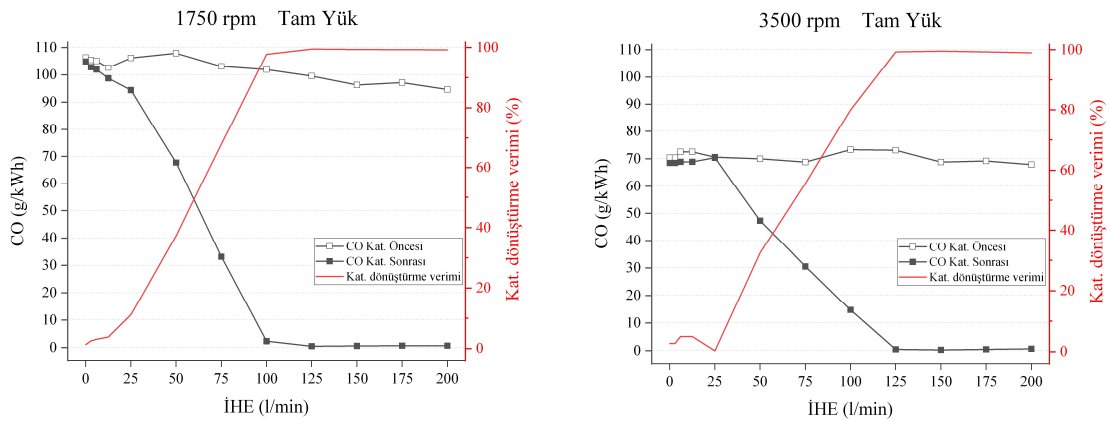
Katalitik konvertörün kendi sıcaklığı ise dönüştürme veriminde etkili bir parametre olduğu için deneylerde konvertörün giriş yüzeyinden temassız sıcaklık ölçümleri yapılarak kontrol edilmiştir. Çeşitli deney şartlarında edilen en düşük sıcaklığın bile konvertörün dönüştürme verimliliği için gerekli olan sıcaklığın üzerinde kaldığı ve konvertörün etkin çalışması için yeterli şartları sağladığı belirlenmiştir.



Şekil 6.2. İHE miktarına bağlı olarak egzoz gazı sıcaklıkları ve lambda değerlerinin Değişimleri

6.1.1. Karbon monoksit (CO)

Şekil 6.3.'de 1750 rpm ve 3500 rpm motor devirlerinde tam yükte yapılan deneylerden elde edilen CO emisyonunun konvertör öncesindeki ve sonrasındaki değişimi ile dönüştürme verimi yer almaktadır. 1750 rpm'de genel olarak konvertör öncesindeki özgül CO miktarlarında dikkate değer bir değişim görülmezken 100 l/min İHE'ye kadar egzoz sistemine verilen hava debisinin artışına bağlı olarak katalitik konvertör sonrasındaki CO miktarında sürekli bir düşüş ve KKDV'de yaklaşık %98 değerine kadar artış görülmektedir. Tam yük şartlarında iyileşme görülmesi lambda değerinin stokiyometrik orana yaklaşması ile ilgilidir. Bu durum Şekil 6.2.'de verilen lambda değerlerindeki değişim ile de paralel gitmektedir ve 100 l/min İHE değerinde lambdanın stokiyometrik orana ulaştığı görülmektedir. HFK'nın konvertörün dönüştürme verimine etkisi dikkate alındığında stokiyometrik oranın bulunduğu dar bir pencerede her üç egzoz emisyonu için optimum seviyeye ulaşıldığı Şekil 3.1'de görülmektedir. Bu nedenle tam yük koşullarında her ne kadar motor zengin karışımla çalışsa da konvertörün CO emisyonlarını dönüştürebilmesi için İHE uygulaması ile egzoz gazları içerisine ilave olarak verilen yeterli miktarda oksijen motorun stokiyometrik hava/yakıt oranında çalışıyormuş gibi konvertörün davranmasını sağlamaktadır. 1750 rpm motor devrindeki deneylerde olduğu gibi 3500 rpm motor devrinde de CO emisyonunda ve verimde iyileşme İHE uygulamasının bir sonucu olarak ortaya çıkmıştır. Devir sebebiyle motora alınan birincil hava akışının artması nedeniyle bu iyileşme 1750 rpm'den farklı olarak biraz daha yüksek İHE miktarında (125 l/min) elde edilmiştir. Bu artışı sınırlayan etken ise 3500 rpm'de motorun stokiyometrik orana daha yakın bir HFK ile çalışmasıdır. 125 l/min İHE uygulaması ile CO için KKDV %99,3 olarak elde edilmiştir.

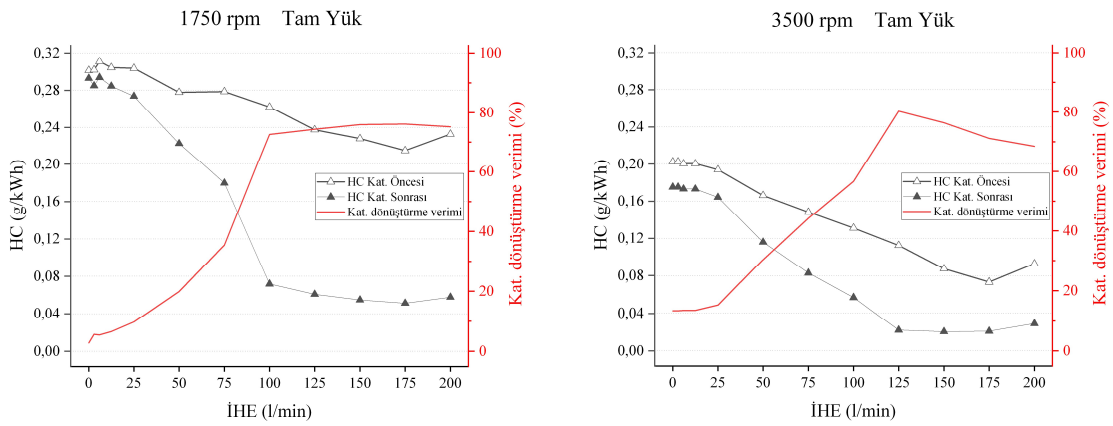


Şekil 6.3. 1750 ve 3500 rpm motor devirlerinde tam yükte İHE miktarına bağlı CO değerlerindeki değişimler

6.1.2. Hidrokarbonlar (HC)

Şekil 6.4.'te 1750 ve 3500 rpm motor devirlerinde tam yükte yapılan deneylerden elde edilen HC emisyonunun konvertör öncesindeki ve sonrasındaki değişimi ile dönüştürme verimi yer almaktadır. 1750 ve 3500 rpm motor devirlerinde konvertör öncesindeki özgül HC emisyonlarında bir azalma görülmektedir. Bu azalma başlangıç noktasından itibaren 200 l/min İHE miktarına doğru 1750 rpm'de yaklaşık %23 iken daha yüksek egzoz gaz sıcaklıklarının elde edildiği 3500 rpm'de yaklaşık olarak %54 olmuştur. Buji ile ateşlemeli motorlarda emisyon kontrol yöntemi olarak dikkate alınan termik reaktörlere benzer olarak manifold ile konvertör arasında bulunan egzoz borusu ve İHE ile sağlanan ilave oksijen takviyesi HC emisyonlarının oksidasyonlarını desteklediği fikri bu değişimin nedeni olarak ileri sürülebilir.

Konvertör çıkışındaki özgül HC emisyonlarındaki azalma ve KKDV'deki artış 1750 rpm motor devrinde özellikle 100 l/min'e kadar 3500 rpm motor devrinde ise 125 l/min'e kadar önemli ölçüde değişmiştir. Verimin 1750 rpm motor devrinde yaklaşık olarak %3'ten %73'e ve 3500 rpm motor devrinde %13'ten %80'e ulaşması İHE'nin kirletici egzoz emisyonlarını düzeltmedeki katkısı olarak ortaya çıkmaktadır.

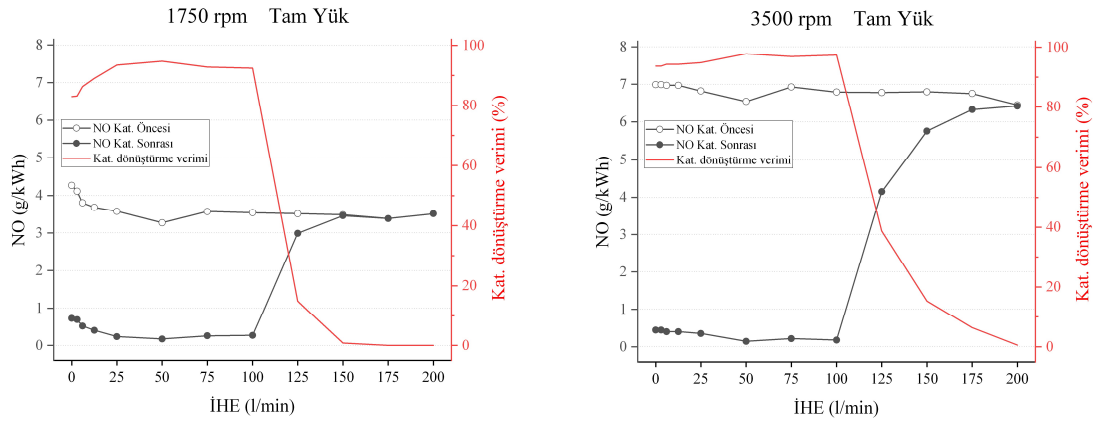


Şekil 6.4. 1750 ve 3500 rpm motor devirlerinde tam yükte İHE miktarına bağlı HC değerlerindeki değişimler

6.1.3. Azot oksit (NO)

Şekil 6.5.'te tam yük koşullarında İHE'nin 1750 ve 3500 rpm motor devirlerinde konvertör öncesi ve sonrasındaki NO emisyonu ile KKDV'ye etkisi verilmiştir. Her iki motor devrinde konvertör girişindeki özgül NO emisyon değerlerinde önemli bir değişim görülmezken KKDV'nin 100 l/min İHE miktarının altındaki debilerde yaklaşık %90'a yakın veya üzerinde olduğu tespit edilmiştir. Bu debinin üzerinde ise; CO ve HC emisyonlarındaki değişime zıt olarak verim hızla azalırken konvertör çıkışındaki NO emisyonun arttığı görülmektedir.

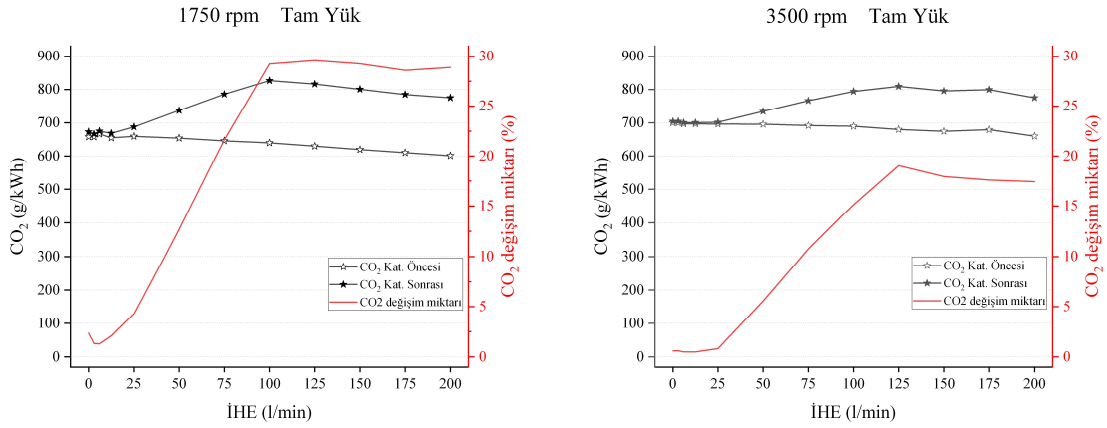
Şekil 3.1'de verilen grafik dikkate alındığında üç yollu katalitik konvertörlerde NO emisyonundaki değişimin CO ve HC'den farklı ve onların tersi bir davranış gösterdiği anlaşılabılır. Bu nedenle konvertörde CO ve HC için oksidasyon sağlayacak bir ortamın oluşması arzu edilirken NO için bunun tam tersi olarak oksijenin indirgeneceği bir ortamın olması istenir. Bu nedenle mevcut şartlarda her iki motor devrinde de NO emisyonu açısından İHE'nin 100 l/min'nin üzerine çıkarılmaması gerektiği öngörülebilir.



Şekil 6.5. 1750 ve 3500 rpm motor devirlerinde tam yükte İHE miktarına bağlı NO değerlerindeki değişimler

6.1.4. Karbon dioksit (CO₂)

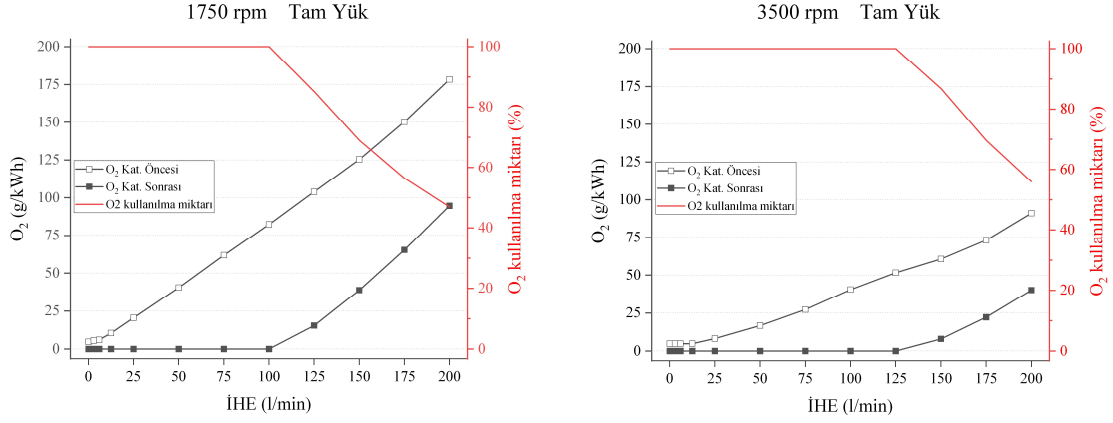
Şekil 6.6.'da tam yük koşullarında İHE kullanımı ile 1750 ve 3500 rpm motor devirlerinde konvertör öncesi ve sonrasındaki CO₂ emisyonundaki değişimleri ve değişim oranı verilmiştir. Katalitik konvertörün CO ve HC emisyonlarını dönüştürmedeki başarısı CO₂ emisyonundaki artışla kendisini gösterecektir. Şekilde de görüldüğü gibi her iki motor devrinde de yaklaşık olarak 100 l/min İHE miktarına kadar konvertör çıkışındaki CO₂'nin arttığı ve bu noktadan sonra kayda değer bir iyileşme olmadığı görülmektedir. Bu değişim CO ve HC'deki değişimin bir sonucu olarak ortaya çıkmaktadır.



Şekil 6.6. 1750 ve 3500 rpm motor devirlerinde tam yükte İHE miktarına bağlı CO₂ değerlerindeki değişimler

6.1.5. Oksijen (O₂)

Şekil 6.7.'de tam yük koşullarında İHE kullanımı ile 1750 ve 3500 rpm motor devirlerinde konvertör öncesi ve sonrasındaki O₂ miktarındaki değişimler ve değişim oranı verilmiştir. Şekil incelendiğinde her iki devirde de İHE miktarındaki artışa bağlı olarak konvertör girişindeki oksijenin lineer bir şekilde arttığı ancak konvertör çıkışındaki oksijen miktarındaki değişimin 1750 rpm motor devrinde 100 l/min ve 3500 rpm motor devrinde ise 125 l/min İHE miktarından sonra görülmeye başlandığı fark edilebilir. Ayrıca oksijenin kullanım yüzdesinin bu akış oranlarından sonra azalmaya başladığı Şekil 6.7'de görülmektedir. Bu oranların motorun çalışma şartlarına bağlı olarak CO ve HC emisyonlarının oksidasyonu için de gerekli en yüksek miktarlar olduğu ifade edilebilir.

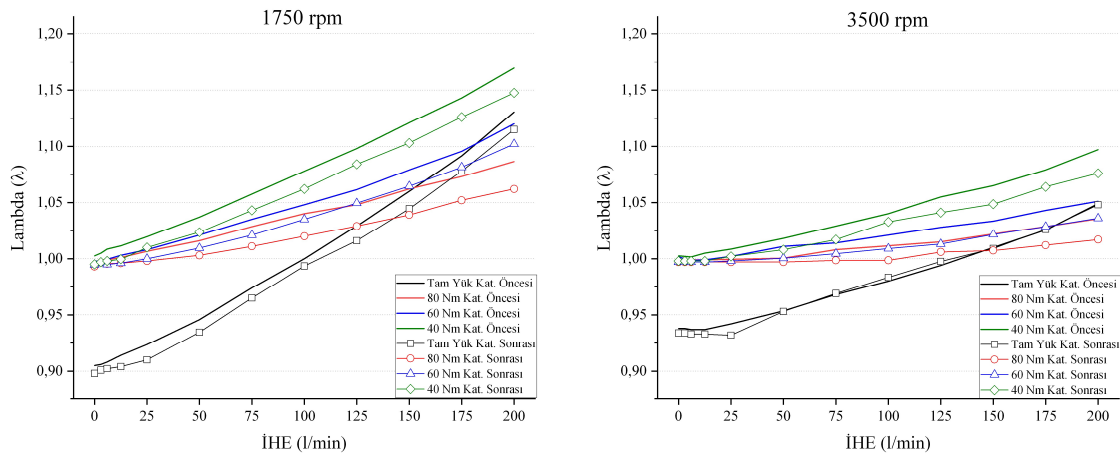


Şekil 6.7. 1750 ve 3500 rpm motor devirlerinde tam yükte İHE miktarına bağlı O₂ değerlerindeki değişimler

6.2. Tam ve Kısmi Yüklerde İHE'nin Egzoz Emisyonlarına Etkisinin Birlikte Değerlendirilmesi

6.2.1. Lambda (λ)

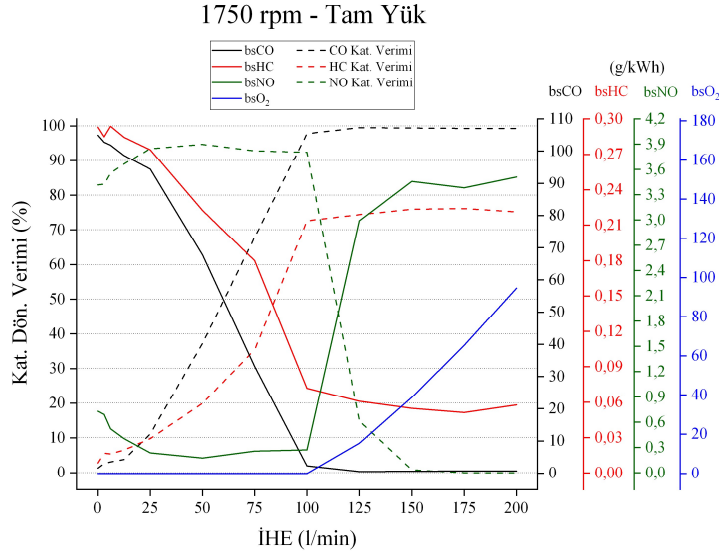
Şekil 6.8.'de görülen konvertör öncesindeki ve sonrasındaki lambda değişimleri özellikle tam yükte giriş ve çıkış değerlerinin birbirine çok yakın olduğunu ve İHE ile sağlanan oksijenin konvertör tarafından tam yükte daha fazla kullanıldığını göstermektedir. İHE'nin egzoz emisyonlarına etkisinin birlikte değerlendirildiği grafiklerde bu durum daha net görülmektedir.



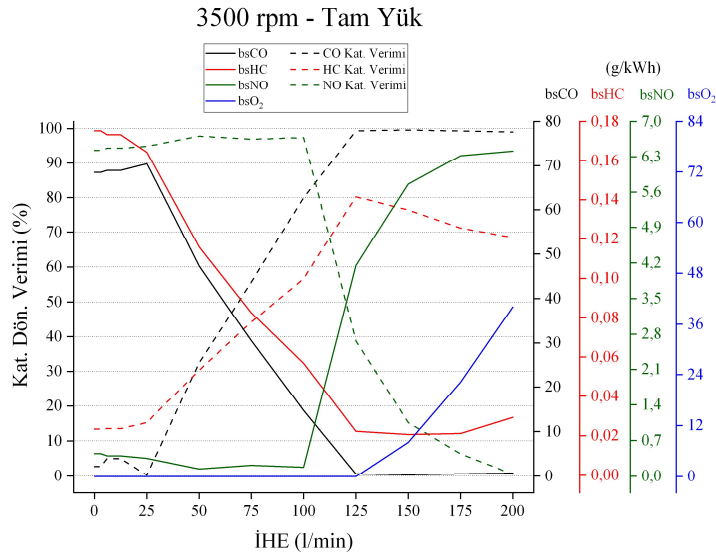
Şekil 6.8. İHE miktarına bağlı egzoz lambda değerlerindeki değişimler

6.2.2. Tam yükte İHE'nin egzoz emisyonlarına etkisinin birlikte değerlendirilmesi

Tam yük koşulunda ve 1750 rpm motor devrinde özgül emisyonlar ve KKDV'lerin İHE miktarına bağlı olarak değişimleri Şekil 6.9.'da, 3500 rpm motor devrindeki değişimler ise Şekil 6.10.'da yer almaktadır. Her iki şekildeki motor çalışma koşulları altında konvertörün hava/yakıt oranına göre CO, HC ve NO emisyonlarını dönüştürme davranışı göz önüne alındığında İHE oranına bağlı olarak benzer bir eğilimin ortaya çıktığı görülebilir. Artan İHE miktarına bağlı olarak konvertör için stokiyometrik hava/yakıt oranına yaklaşan bir çalışma ortamının oluştuğu (Şekil 6.8.) ve verim ile egzoz emisyonlarının buna göre şekillendiği Şekil 6.9. ve 6.10.'da görülmektedir. Özgül CO ve HC emisyonları 1750 rpm'de yaklaşık 100 l/min, 3500 rpm'de ise yaklaşık 125 l/min İHE debilerinde en düşük değerlerine doğru hemen hemen lineer bir azalma gösterirken bu oranlardan daha yüksek miktarlarda ciddi bir değişim göstermemektedirler. NO emisyonu ise, başlangıçta konvertörün zengin hava/yakıt oranında çalışması nedeniyle CO ve HC emisyonlarının aksine düşük bir değere sahiptir ve 1750 rpm'de yaklaşık 25 l/min, 3500 rpm'de ise yaklaşık 50 l/min İHE debilerinde en düşük değerlerine azalmaktadır. Her iki motor devrinde de yaklaşık 100 l/min İHE debisinden sonra hızla artmaktadır. Artan İHE'nin konvertör için fakir hava/yakıt oranında çalışma ortamı sağlaması NO dönüşümünü olumsuz etkilemektedir. Tam yük şartlarında her üç emisyon dikkate alınarak birlikte değerlendirildiğinde konvertör sonrası en düşük emisyonlar ve en yüksek dönüştürme verimleri için İHE'nin 1750 rpm'de 100 l/min, 3500 rpm'de ise 100-125 l/min debilerine sahip olması gerektiği ifade edilebilir. Bu düşüncüyü konvertör sonrasındaki oksijen miktarı da desteklemektedir. Zira belirtilen debilere kadar konvertör çıkışında oksijen görülmezken bu noktalardan sonra artış kaydetmiştir. Yani bu optimum noktalardan sonra konvertör oksijene ihtiyaç duymamaktadır.



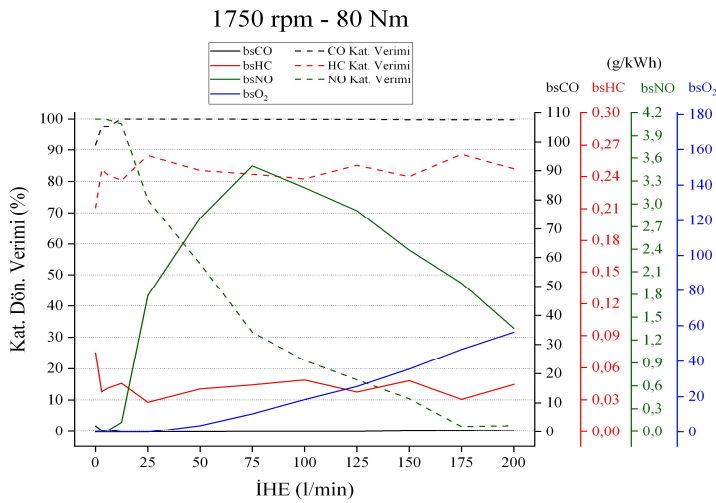
Şekil 6.9. 1750 rpm motor devrinde ve tam yükte İHE miktarına bağlı egzoz emisyonlarının ve KKDV'lerin değişimi



Şekil 6.10. 3500 rpm motor devrinde ve tam yükte İHE miktarına bağlı egzoz emisyonlarını ve KKDV'lerin değişimi

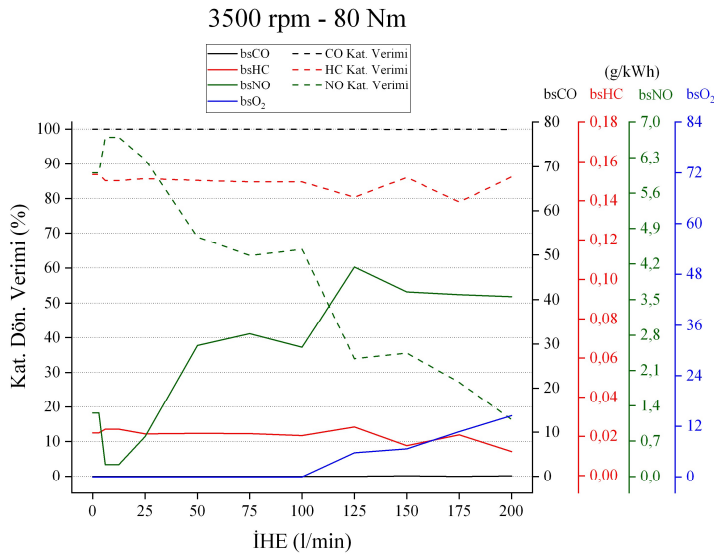
6.2.3. Kısmi yüklerde İHE'nin egzoz emisyonlarına etkisinin birlikte değerlendirilmesi

80 Nm'lik kısmi yük koşulunda ve 1750 rpm motor devrinde özgül emisyonlar ve KKDV'lerin İHE miktarına bağlı olarak değişimleri Şekil 6.11.'de, 3500 rpm motor devrindeki değişimler ise Şekil 6.21.'de yer almaktadır. 1750 rpm'de çalışan motor için 80 Nm yükte CO miktarı başlangıçta 2,1 g/kWh iken 12,5 l/min İHE kullanımına kadar düşmüş ve 0 g/kWh değere ulaşmıştır. 75 l/min İHE'den itibaren ise kısmen artarak 0,5 g/kWh değerine kadar ulaşmıştır. HC miktarı başlangıçta 0,074 g/kWh iken 25 l/min İHE kullanımına kadar düşmüş ve en düşük değeri 0,0277 g/kWh olarak ölçülmüştür. Daha sonrasında ise tekrar artarak 0,478 g/kWh değerine kadar yükselmiştir. NO miktarı ise başlangıçta 0 g/kWh iken İHE miktarı arttıkça küçük bir miktar artmış, 12,5 l/min İHE sonrasında ise sert bir artış eğilimine girmiştir. Motorun 0,995 lambda ile neredeyse stokiyometrik orana yakın çalıştığı bu rejimde çok düşük miktarda İHE kullanımı optimum emisyon değerlerini sağlamak için yeterli olmuş, İHE kullanımı arttıkça hem egzoz hattındaki termik reaksiyonlar hem de katalitik konvertör içerisindeki kimyasal reaksiyonlar olumsuz etkilenmiştir. Sonuç olarak 80 Nm yükte İHE kullanmak NO miktarını başlangıçta küçük miktar düşürdükten sonra ciddi miktarda arttırmasına karşılık HC miktarında başlangıçta bir miktar azalma sağlamış ve CO üzerinde ciddi bir etki göstermemiştir. Bu sebeple kullanılacak İHE miktarı belirlenirken NO, HC ve CO miktarları arasında dengeli bir nokta seçilmeye çalışılmıştır. Bu motor rejiminde motorun kullandığı havanın yaklaşık %1,47'sine denk gelen 12,5 l/min debide İHE kullanmak optimum koşulları sağlamaktadır.



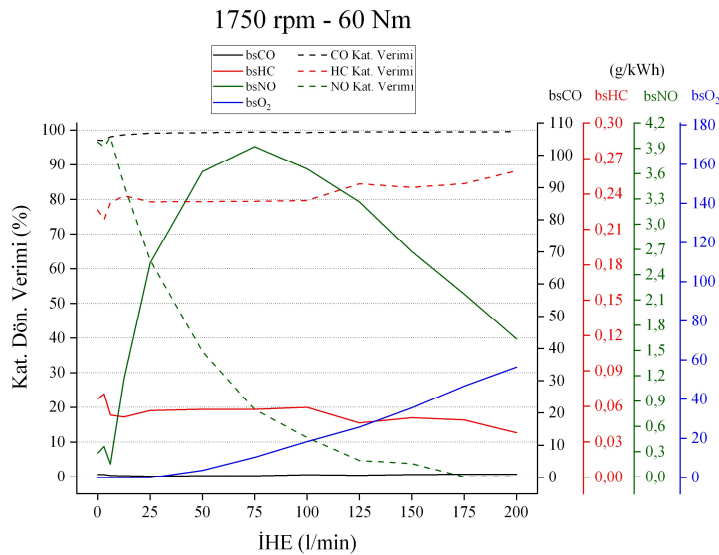
Şekil 6.11. 1750 rpm motor devrinde ve 80 Nm'lik kısmi yükte İHE miktarına bağlı egzoz emisyonlarının ve KKDV'lerin değişimi

Şekil 6.12.'de görüldüğü gibi 80 Nm yükte ve 3500 rpm motor devrinde CO miktarı başlangıçta 0 g/kWh iken İHE kullanımı ile hafif artarak 0,1 g/kWh değerine kadar ulaşmıştır. HC miktarı başlangıçta 0,0217 g/kWh iken İHE kullanımı ile hafif azalarak 0,0122 g/kWh değerine ulaşmıştır. NO miktarı ise başlangıçta 1,258 g/kWh iken İHE miktarı arttıkça azalarak 12,5 l/min İHE verildiğinde minimum değeri olan 0,2361 g/kWh değerine ulaşmış, 12,5 l/min İHE üzerinde ise sert bir şekilde artış eğilimine girmiştir. Motorun 0,997 lambda ile neredeyse stokiyometrik orana yakın çalıştığı bu rejimde çok düşük miktarda İHE kullanımı optimum emisyon değerlerini sağlamak için yeterli olmuş, İHE kullanımı arttıkça hem egzoz hattındaki termik reaksiyonlar hem de katalitik konvertör içerisindeki kimyasal reaksiyonlar olumsuz etkilenmiştir. Sonuç olarak 80 Nm yükte İHE kullanmak NO miktarını bir noktaya kadar düşürmüş daha sonra arttırmış olmasına karşılık HC ve CO üzerinde ciddi bir etki göstermemiştir. Bu sebeple NO miktarı, kullanılacak uygun İHE miktarını belirlemede etkili olmuştur. Bu sebeple bu motor rejiminde motorun kullandığı havanın yaklaşık %0,72'sine denk gelen 12,5 l/min debide İHE kullanmak optimum koşulları sağlamaktadır.



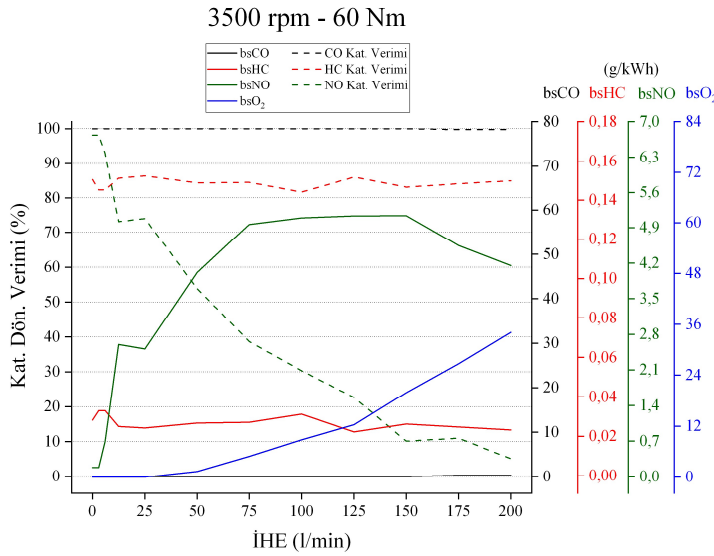
Şekil 6.12. 3500 rpm motor devrinde ve 80 Nm'lik kısmi yükte İHE miktarına bağlı egzoz emisyonlarının ve KKDV'lerin değişimi

60 Nm’lik kısmi yük koşulunda ve 1750 rpm motor devrinde özgül emisyonlar ve KKDV’lerin İHE miktarına bağlı olarak değişimleri Şekil 6.13.’de, 3500 rpm motor devrindeki değişimler ise Şekil 6.14.’de yer almaktadır. 1750 rpm ve 60 Nm yükte başlangıçta 0,9 g/kWh olan CO miktarı 25 l/min İHE kullanımına kadar düşmüş ve en düşük değer olan 0,4 g/kWh miktarına ulaşmış, daha sonra ise artma eğilimi göstererek 1 g/kWh’e kadar yükselmiştir. HC miktarı başlangıçta 0,0667 g/kWh iken 12,5 l/min İHE kullanımında ise en düşük seviyesi olan 0,0511 g/kWh değerine ulaşmıştır. NO miktarı ise başlangıçta 0,2858 g/kWh iken 6 l/min İHE kullanıldığına en düşük değeri olan 0,1551 g/kWh’e ulaşmıştır daha sonrasında ise çok hızlı bir şekilde artmıştır. Motorun 0,99775 lambda değerinde çalıştığı bu koşullarda çok düşük miktarda İHE kullanımı optimum emisyon değerlerini sağlamak için yeterli olmuş, İHE kullanımı arttıkça hem egzoz hattındaki termik reaksiyonlar hem de katalitik konvertör içerisindeki kimyasal reaksiyonlar olumsuz etkilenmiştir. Sonuç olarak 60 Nm yükte İHE kullanmak NO miktarını arttırmasına karşılık HC miktarında başlangıçta bir miktar azalma sağlamış ve CO üzerinde ciddi bir etki göstermemiştir. Bu sebeple kullanılacak İHE miktarı belirlenirken NO, HC ve CO miktarları arasında dengeli bir nokta seçilmeye çalışılmıştır. Bu sebeple bu motor rejiminde motorun kullandığı havanın yaklaşık % 0,42’sine denk gelen 6 l/min debide İHE kullanmak optimum nokta olarak dikkate alınabilir.



Şekil 6.13. 1750 rpm motor devrinde ve 60 Nm’lik kısmi yükte İHE miktarına bağlı egzoz emisyonlarının ve KKDV’lerin değişimi

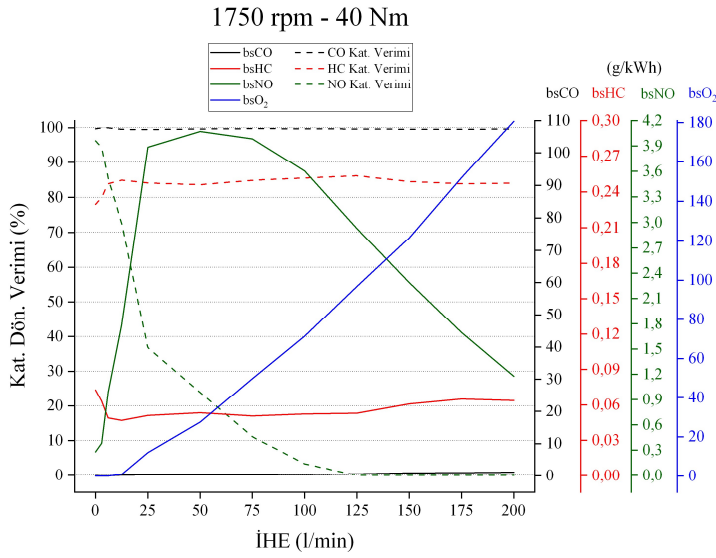
3500 rpm motor devrinde ve 60 Nm yükte CO miktarı başlangıçta 0 g/kWh iken İHE kullanımı ile bir miktar artarak 0,3 g/kWh değerine kadar ulaşmıştır. HC miktarı başlangıçta 0,0282 g/kWh iken İHE kullanımı ile 0,0233 g/kWh değerine kadar azalmıştır. NO miktarı ise başlangıçta 0,1834 g/kWh iken İHE miktarı arttıkça sert bir şekilde artış eğilimine girmiştir. Motor 1,0015 lambda değerinde çalışması ve konvertör sonrasındaki emisyon değerleri egzoz sistemine ilave oksijen gereksinimi olmadığını göstermektedir. Bu motor rejiminde İHE kullanılması hem egzoz hattındaki termik reaksiyonları hem de katalitik konvertör içerisindeki kimyasal reaksiyonları olumsuz etkilemektedir. Sonuç olarak 60 Nm yükte İHE kullanmak NO miktarını artırırken HC ve CO üzerinde ciddi bir etki göstermemiştir. Bu sebeple bu motor rejiminde İHE kullanılmanın gerekli olmadığı görülmektedir.



Şekil 6.14. 3500 rpm motor devrinde ve 60 Nm’lik kısmi yükte İHE miktarına bağlı egzoz emisyonlarının ve KKDV’lerin değişimi

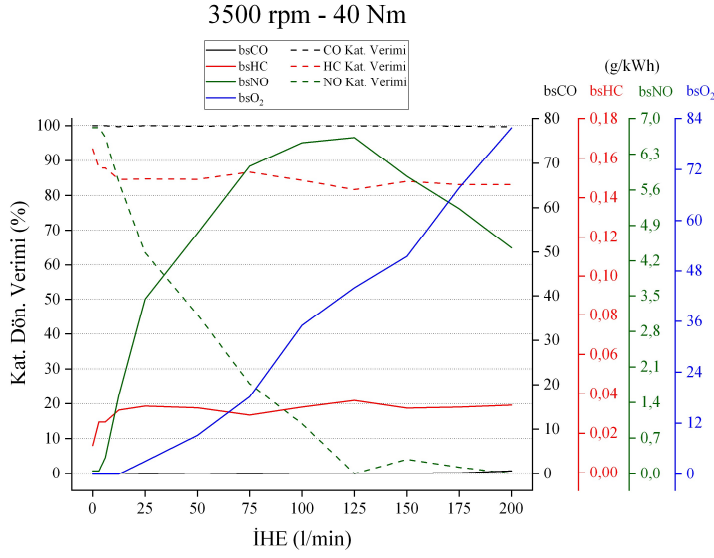
40 Nm’lik kısmi yük koşulunda ve 1750 rpm motor devrinde özgül emisyonlar ve KKDV’lerin İHE miktarına bağlı olarak değişimleri Şekil 6.15.’de, 3500 rpm motor devrindeki değişimler ise Şekil 6.16.’da yer almaktadır. 1750 rpm motor devrinde ve 40 Nm yükte CO miktarı başlangıçta 0,1 g/kWh iken 3 ve 6 l/min İHE kullanımlarında 0 g/kWh değerine ulaşmış, 12,5 l/min İHE kullanımından itibaren ise en fazla 1,1 g/kWh değerine ulaştığı görülmüştür. HC miktarı başlangıçta 0,0727 g/kWh iken 12,5 l/min İHE kullanımına kadar düşmüş ve en düşük değeri 0,0469 g/kWh olarak ölçülmüştür. Daha sonrasında ise tekrar artış eğilimine girmiş ve 0,0636 g/kWh değerine kadar yükselmiştir. NO miktarı ise

başlangıçta 0 g/kWh iken İHE miktarı arttıkça sert bir artış eğilimine girmiştir. Motor zaten 1,0025 lambda ile çalıştığı için egzoz ilave oksijen gereksinimi olmayan bu motor rejiminde İHE kullanılması hem egzoz hattındaki termik reaksiyonları hem de katalitik konvertör içerisindeki kimyasal reaksiyonları olumsuz etkilemiştir. Sonuç olarak 40 Nm yükte İHE kullanmak NO miktarını arttırırken HC ve CO üzerinde ciddi bir etki göstermemiştir. Bu sebeple bu motor rejiminde İHE kullanılması gereksizdir.



Şekil 6.15. 1750 rpm motor devrinde ve 40 Nm’lik kısmi yükte İHE miktarına bağlı egzoz emisyonlarının ve KKDV’lerin değişimi

3500 rpm motor devrinde ve 40 Nm yükte CO miktarı başlangıçta 0 g/kWh iken İHE kullanımı ile bir miktar artarak 0,6 g/kWh değerine kadar ulaşmıştır. HC miktarı başlangıçta 0,0139 g/kWh iken İHE kullanımı ile hafif artarak 0,0342 g/kWh değerine kadar ulaşmıştır. NO miktarı ise başlangıçta 0,0573 g/kWh iken İHE miktarı arttıkça çok hızlı bir şekilde artış eğilimine girmiştir. Motor zaten 1,0025 lambda ile çalıştığı için egzoz ilave oksijen gereksinimi olmayan bu motor rejiminde İHE kullanılması egzoz emisyonlarında ve KKDV’de dikkate değer bir iyileşme sağlamamıştır. Sonuç olarak 40 Nm yükte İHE kullanmak NO ve HC miktarını arttırmasına karşılık CO üzerinde ciddi bir etki göstermemiştir. Bu sebeple bu motor rejiminde İHE kullanılması gereksizdir.



Şekil 6.16. 3500 rpm motor devrinde ve 40 Nm’lik kısmi yükte İHE miktarına bağlı egzoz emisyonlarının ve KKDV’lerin değişimi

6.3. Optimum İHE Kullanım Oranları

Çizelge 6.1.’de deneysel çalışmanın gerçekleştirildiği motor devri ve yüküne göre optimum İHE miktarları verilmiştir. Dikkate alınan deney koşullarında optimum İHE miktarının en fazla 100-125 l/min arasında olması gerektiği ve özellikle 40 Nm ve 60 Nm’lik kısmi yüklerde İHE kullanımına gerek olmadığı görülmüştür.

Çizelge 6.1. Motor devri ve yüküne göre optimum İHE miktarları

DEVİR (rpm)	YÜK (Nm)	İHE (l/min)	İHE/BHE (%)
1750	40	0	0
1750	60	6	0,42
1750	80	12,5	1,47
1750	Tam Yük	100	9,83
3500	40	0	0
3500	60	0	0
3500	80	12,5	0,72
3500	Tam Yük	100-125	4,60-5,80

7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Ülkemizde yanma sistemlerinde İHE kullanımına yönelik lisansüstü tezler oldukça sınırlı olup gerçekleştirilen bu çalışmanın içten yanmalı motorlarda değişken oranlarda İHE kullanımına yönelik ilk çalışma olarak nitelendirilebilir. Uluslararası literatürde de İHE daha çok soğukta ilk hareket ve ısınma sürecindeki emisyonların azaltılmasına yönelik çalışmalarda öne çıkmaktadır.

Deneysel olarak gerçekleştirilen bu çalışmada buji ile ateşlemeli bir motordan kaynaklanan egzoz emisyonlarının azaltılmasına yönelik olarak uygun İHE kullanım oranları araştırılmıştır. Motorun çeşitli çalışma koşulları altında egzoz emisyonlarında ve katalitik konvertör veriminde optimum İHE miktarları ile önemli ölçüde iyileşmeler elde edilmiştir. Motorun çalışma koşullarına bağlı olarak katalitik konvertör sonrasındaki CO emisyonunda yaklaşık olarak %98 ve HC emisyonlarında ise %75 azalma sağlanırken, NO emisyonunda da yaklaşık %69'a kadar düşüş sağlanabileceği görülmüştür. NO emisyonundaki iyileşme motorun çalışma şartlarına bağlı olarak İHE miktarının uygun seviyelerde kullanılması koşuluyla sağlanabileceği ifade edilebilir. İHE temelde konvertör öncesinde oksidasyon sağlayan ve konvertörün CO ve HC emisyonlarını dönüştürebilmesi için ihtiyaç duyacağı oksijeni veren bir sistem olarak ele alındığından NO emisyonlarının azaltılması ana hedef olmamaktadır. Ancak İHE ile konvertörün her üç emisyonu da en yüksek verimle dönüştürebileceği egzoz gazı ortamı hazırlanabilir. Bu nedenle çalışmada motorun çalışma koşullarına bağlı olarak optimum İHE oranları belirlenirken CO, HC ve NO emisyonlarının birlikte en yüksek iyileşme sağladığı miktarlar tespit edilmeye çalışılmıştır.

Motorun zengin karışımla çalıştığı rejimlerde ($\lambda < 1$ olduğu tam yükte) İHE kullanılması oksijen eksikliğini gidermekte fakat çevre sıcaklığında verilen hava nedeniyle egzoz sıcaklığını düşürmektedir. Belirli bir İHE kullanımına kadar sağlanan oksijenin termal reaksiyonu iyileştirirken sıcak düşüşü konvertör verimini olumsuz etkilememiştir. Ancak belirli bir seviyenin üzerinde İHE kullanımda sıcaklık düşüşü nedeniyle termal reaksiyonlar kötü etkilenebilmektedirler. Bu çalışma koşulları altında konvertörün egzoz emisyonlarını dönüştürebilme davranışı incelendiğinde özellikle CO ve HC emisyonlarında NO emisyonunu olumsuz etkilemeden hatta iyileşme sağlayarak dikkate değer azalmalar elde edilebileceği görülmüştür. Zengin olarak nitelendirilen stokiyometrik hava/yakıt

oranlarından daha düşük karışımla motor çalıştığında katalitik konvertör içerisindeki kimyasal reaksiyonların gerçekleşmesi için yeterli NO ve O₂ bulunmadığından İHE kullanımı reaksiyonları arttırarak CO ve HC miktarlarında ciddi azalma sağlamaktadır. Belirli bir seviyenin üzerinde ise tepkimelerde NO kullanımını azalttığı için NO miktarını sert bir şekilde arttırmaktadır.

Motorun stokiometrik hava/yakıt oranına yakın karışımla çalıştığı rejimlerde ($\lambda \approx 1$ olduğu kısmi yüklerde) egzozda zaten serbest halde oksijen olduğu için İHE kullanmak sadece egzoz gazı sıcaklığını düşürdüğü için termal reaksiyonları olumsuz etkilemektedir. Bu çalışma koşullarında konvertör hâlihazırda CO, HC ve NO emisyonlarını en yüksek verimle dönüştürebildiği oranlara yakın çalıştığından İHE kullanımı katalitik konvertör içerisindeki kimyasal reaksiyonları daha fazla iyileştirmemiş hatta sağladığı oksijen nedeniyle katalitik konvertör çıkışındaki NO miktarında önemli artışa sebep olmuştur. Bu nedenle kısmi yüklerde optimum İHE miktarının belirlenmesi için konvertörün NO emisyonunu dönüştürme verimi etkili olmuştur.

Yapılan bu çalışmada temel hedef konvertörün NO dönüşüm verimini olumsuz etkilemeden CO ve HC emisyonlarını en yüksek verimle azaltılmasını sağlayacak İHE oranını tespit etmektir. Bu amaca en uygun olan motor çalışma koşulunun $\lambda < 1$ olduğu tam yük veya tam yüke yakın hava/yakıt oranlarında İHE'nin yeterli seviyede uygulanması gerektiği tespit edilmiştir. Çalışmada ele alınan NO emisyonu, N₂ ve O₂'nin yaptıkları tüm bileşikler ifade eden ve NO_x olarak nitelendirilen emisyonu da temsil edebileceği ifade edilebilir. Zira genelde NO, NO_x'in %90-95'ini oluşturmaktadır.

İHE'nin buji ile ateşlemeli bir motorda egzoz emisyonlarına ve katalitik konvertör verimine etkisini incelendiği bu çalışma farklı motor çeşitleri veya yanma sistemleri için de ele alınabilir. Yeterli miktarda İHE akış oranı sağlayacak sistemlerin tasarımı ve uygulamasına yönelik çalışmalar da yapılabilir.

KAYNAKLAR

1. IJER editorial: Reitz, R. D., Ogawa, H., Payri, R., Fansler, T., Kokjohn, S., Moriyoshi, Y., Agarwal, A. K., Arcoumanis, D., Assanis, D., Bae, C., Boulouchos, K., Canakci, M., Curran, S., Denbratt, I., Gavaises, M., Guenther, M., Hasse, C., Huang, Z., Ishiyama, T., Johansson, B., Johnson, T. V., Kalghatgi, G., Koike, M., Kong, S. C., Leipertz, A., Miles, P., Novella, R., Onorati, A., Richter, M., Shuai, S., Siebers, D., Su, W., Trujillo, M., Uchida, N., Vaglieco, B. M., Wagner, R. M., ve Zhao, H. (2020). The future of the internal combustion engine. *International Journal of Engine Research*. 21(1), 3-10.
2. Ergeneman, M., Mutlu, M., Kutlar, O. A., Arslan, H. (1998). *Taşıtlardan Kaynaklanan Egzoz Kirleticileri*. İstanbul: Birsan Yayınevi, 1,5,7-9,41,44-48.
3. Çengel, Y. A. and Boles (2012), M. A. *Termodinamik Mühendislik Yaklaşımıyla (Beşinci Baskı)*. (çev. A. Pınarbaşı, E. Buyruk, C. Özalp, A. Bilgin, H. Günerhan, S. Basan). İzmir: Güven Bilimsel Yayınları, 752-761.
4. Ganesan, V. (2007) *Internal Combustion Engines* (Third edition). New Delhi: Tata McGraw-Hill Education Private Limited, 471-507.
5. Omaye, S. T. (2002). Metabolic modulation of carbon monoxide toxicity. *Toxicology*, 180(2), 139-150.
6. Kandiş, H., Katırcı, Y., ve Karapolat, B. S. (2009). Karbonmonoksit Zehirlenmesi. *Düzce Üniversitesi Tıp Fakültesi Dergisi*, 11(3), 54-60.
7. Gorman, D., Drewry, A., Huang, Y. L., and Sames, C. (2003). The Clinical Toxicology of Carbon Monoxide Toxicology. *Toxicology*, 187(1), 25-38.
8. Heywood, J. B. (1988). *Internal Combustion Engine Fundamentals*. New York: McGraw-Hill, 577-592, 597-598, 649-659.
9. Koltsakis, G. C., and Stamatelos, A. M. (1997). Catalytic Automotive Exhaust Aftertreatment. *Progress in Energy and Combustion Science*, 23(1), 1-39.
10. Kummer, J. T. (1980). Catalysts for automobile emission control. *Progress in Energy and Combustion Science*, 6(2), 177-199.
11. Shayler, P. J., Tinwell, P. R., Dixon, J., and Eade, D., (1994). A Development Methodology for Improving the Cold Start Performance of Spark Ignition Engines. *SAE Technical Paper 940084*.
12. Mahadevan, G., and Subramanian, S. (2017). 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*
13. Mianzarasvand, F., Shirneshan, A., and Afrand, M. (2017). Effect of Electrically Heated Catalytic Converter on Emission Characteristic of A Motorcycle Engine in Cold-Start Conditions: CFD Simulation and Kinetic Study. *Applied Thermal Engineering*, 127, 453-464.

14. Joshi, A. (2017). Progress and Outlook on Gasoline Vehicle Aftertreatment Systems. *Johnson Matthey Technology Review*, 61(4), 311–325.
15. T. Boger, T., Rose, D., Nicolin, P., Gunasekaran N., and Glasson, T. (2015) Oxidation of Soot (Printex® U) in Particulate Filters Operated on Gasoline Engines. *Emission Control Science and Technology*, 1, 49-63.
16. Michael W. Kochs, M. W., Kloda, M., Venne, G., and Golden, J. E. (2001). Innovative Secondary Air Injection Systems. *SAE Technical Paper*
17. Borland, M., and Zhao, F. (2002). Application of Secondary Air Injection for Simultaneously Reducing Converter-In Emissions and Improving Catalyst Light-Off Performance. *SAE Technical Paper*
18. Kollmann, K., Abthoff, J., Zahn, W., Bischof, H., and Göhre, J. (1994). Secondary Air Injection with a New Developed Electrical Blower for Reduced Exhaust Emissions. *SAE Technical Paper*
19. Lee, D., and Heywood, J. B. (2010). Effects of Secondary Air Injection During Cold Start of SI Engines. *SAE International Journal of Engines*, 3(2), 182-196.
20. Son, G. S., Kim, D. J., Lee, K. Y., Choi, E. R., and Kim, Y. W. (1999). A Study on the Practicability of a Secondary Air Injection for Emission Reduction, *SAE Technical Paper*
21. Demirci, E. (2014). *Alternatif Yakıtların ve İkincil Hava Enjeksiyonun Katalitik Konvertör Verimine Etkisinin Deneysel Olarak İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara
22. TS 1231. “İçten Yanmalı Motorlar- Muayene ve Deney Esasları”, *Türk Standartları Enstitüsü*, (1991)
23. Ağbulut, Ü., Sarıdemir, S., and Albayrak, S. (2019). Experimental Investigation of Combustion, Performance and Emission Characteristics of a Diesel Engine Fuelled with Diesel-Biodiesel-Alcohol Blends. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*
24. Karagöz, Y. K., Balcı, Ö. ve Köten, H. (2019). Investigation of Hydrogen Usage on Combustion Characteristics and Emissions of a Spark Ignition Engine. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44(27), 14243-14256.
25. Guillin-Estrada, W., Maestre-Cambronel, D., Bula-Silvera, A., Gonzalez-Quiroga, A. and Duarte-Forero, J. (2021), Combustion and Performance Evaluation of a Spark Ignition Engine Operating with Acetone–Butanol–Ethanol and Hydroxy. *Applied Sciences*, 11(11), 5282.



GAZİ GELECEKTİR..