

**EGZoz GAZI RESİRKÜLASYONUNUN (EGR)
MOTOR PERFORMANSI ÜZERİNDEKİ
ETKİLERİNİN İNCELENMESİ**

Aylin TOK



T.C.
ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

EGZOS GAZI RESİRKÜLASYONUNUN (EGR)
MOTOR PERFORMANSI ÜZERİNDEKİ
ETKİLERİNİN İNCELENMESİ

Aylin TOK

Doç.Dr. İhsan Karamangil
(Danışman)

YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA-2010
Her hakkı saklıdır

TEZ ONAYI

Aylin TOK tarafından hazırlanan “EGZOZ GAZI RESİRKÜLASYONUNUN (EGR) MOTOR PERFORMANSI ÜZERİNDEKİ ETKİLERİNİN İNCELENMESİ” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından oy birliği/oy çokluğu ile Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı’ nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ/DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman : Doç.Dr. İhsan KARAMANGİL

Başkan : Prof.Dr. Ali SÜRME
U.Ü. Mühendislik-Mimarlık Fakültesi,
Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı

Üye : Prof.Dr. Atakan AVCI
U.Ü. Mühendislik-Mimarlık Fakültesi,
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Üye : Doç.Dr. İhsan KARAMANGİL
U.Ü. Mühendislik-Mimarlık Fakültesi,
Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı

Yukarıdaki sonucu onaylarım

Prof. Dr. Cengiz ELMACI
Enstitü Müdürü
12/11/2010

U.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu
- başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

**12/11/2010
Aylin TOK**

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

EGZUZ GAZI RESİRKÜLASYONUNUN (EGR) MOTOR PERFORMANSI ÜZERİNDEKİ ETKİLERİNİN İNCELENMESİ

Aylin TOK

Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. İhsan KARAMANGİL

Motorlardan yayılan azotoksit emisyonlarını azaltma yöntemlerinden birisi de EGR (Egzoz Gazı Resirkülasyonu)' dir. Azotoksit (NO_x) emisyonlarının insan sağlığı ve çevre açısından ciddi zararları olduğu bilinmektedir. Kandaki hemoglobin ile birleşerek akciğer dokusuna zarar vermesi, atmosferdeki su buharı ile birleşerek toprağa ve bitkilere zarar veren asit yağmurlarına sebep olması örnek olarak verilebilir. Ayrıca fotokimyasal sis oluşumunu da etkilemektedir.

Bu çalışmada, Common Rail yakıt püskürtme sistemine sahip, 1,3 lt' lik bir dizel motorunda farklı oranlarda EGR kullanımının (% 10, 15, 20, 25, 30) motor performansı ve egzoz emisyonları üzerindeki etkisi üç aşamalı olarak incelenmiştir. İlk aşama olarak egzoz gazları motorun emme hattına kontrollü bir şekilde geri gönderilmiştir. Artan EGR yüzdesi ile birlikte azot oksit emisyonları ve motor gücü azalırken, özgül yakıt tüketimi, duman yoğunluğu, CO ve HC emisyonlarının arttığı görülmüştür.

İkinci aşamada deneyler aynı şartlar altında motora dizel oksidasyon katalisti ilavesi ile tekrarlanmıştır. Bu durumda HC, CO ve NO_x emisyonlarında iyileşme gözlenmiştir. Katalist ve EGR etkisi ile NO_x emisyonları ortalama % 91,6 oranında iyileşme görülmüştür.

Son aşamada ise deneyler aynı şartlar altında değişik oranlardaki (% 20, % 50, % 100) soya yağı metil esteri ile tekrar edilmiştir. Sonuç olarak soya yağı metil esterinin CO ve HC emisyonlarını azaltırken, NO_x emisyonlarını arttırdığı görülmüştür. EGR' nin soya yağı metil esteri ve karışımları üzerindeki etkisi ise dizel yakıtı ile benzerlik göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: Dizel motoru, EGR, azot oksit emisyonları, soya yağı metil esteri

2010, vii+88 sayfa

ABSTRACT

MSc Thesis

THE INVESTIGATION OF EXHAUST GAS RECIRCULATION (EGR) IMPACTS ON ENGINE PERFORMANCE

Aylin TOK

Uludağ University
Graduate School of Natural And Applied Sciences
Department of Mechanical Engineering

Supervisor: Assoc. Prof. İhsan KARAMANGİL

One of the most effective technique for reducing NO_x emissions that emitted from engines is exhaust gas recirculation (EGR). It is known that nitrogen oxide emissions have serious damage on human health and the environment. Nitrogen oxides combine with hemoglobin in the blood can damage and cause paralysis on lungs tissue. In addition, nitrogen oxides cause photochemical fog, damage soil and plants, combined with the water in the atmosphere trigger acid rain.

In this research, the impacts of using different ratio of EGR (% 10, 15, 20, 25, 30) on an 1,3 lt engine has common rail fuel injection system on engine performance and exhaust emissions were traced as three phases. In the first phase exhaust gases were recirculated to the engine intake line with controlled way. The results of experiment show that specific fuel consumption, smoke, CO and HC emissions increased but nitrogen oxide emissions and engine power decreased drastically with increasing ratio of EGR.

In the second phase under the same conditions experiments were done with diesel oxidation catalyst. In this case HC, CO and NO_x emissions were decreased.

In last phase experiments done again with different percentage (%20, %50, %100) of soybean oil methyl ester. As a result CO and HC emissions were decreased, NO_x emissions were increased related with percentage of soybean oil methyl ester. EGR effects are the similar with diesel fuel and biodiesel.

Key Words: Diesel engine, EGR, nitrogen oxide emissions, soybean oil methyl ester

2010, vii+88 pages

TEŞEKKÜR

Tez alıőmamın her aşamasında yardımcı olan değerli hocam Doç. Dr. İhsan KARAMANGİL' e, bilgilerini paylaőan Mak. Yük. Müh. Sn. Őükri Kamil MERGEN' e ve Sn. Ramazan Dönmez' e teşekkür ederim.

Aylin TOK

12/11/2010

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
İÇİNDEKİLER	iv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ	viii
GİRİŞ	1
1. KAYNAK ARAŞTIRMASI	5
2. MATERYAL VE YÖNTEM.....	10
2.1 NO _x Emisyonları ve EGR	10
2.1.1 NO _x Oluşumu	11
2.1.1.1 Termal NO _x Oluşumu	11
2.1.1.2 Yakıt kaynaklı NO _x Oluşumu	12
2.1.1.3 Ani NO _x Oluşumu	13
2.1.2 Dizel Motorlarında NO _x Kontrol Yöntemleri	13
2.1.3 Yakıtın NO _x emisyonlarına etkisi	14
2.1.4 Motor parametrelerinin NO _x emisyonlarına etkisi.....	15
2.1.5 Egzoz yardımcı sistemlerinin NO _x emisyonlarına etkisi.....	21
2.1.5.1 SCR (üre enjeksiyonlu sistem).....	21
2.1.5.2 NAC (NO _x emici katalistleri).....	22
2.1.5.3 DOC (dizel oksidasyon katalisti)	23
2.2 Egzoz Gazları Denetimi ve Standartları.....	25
2.3 EGR Çalışma Prensipleri	30
2.3.1 EGR tipleri	34
2.3.2 Farklı motor çalışma durumları için EGR' nin çalışması	35
2.3.3 EGR ve turboşarj ilişkisi	36
2.3.4 EGR' nin motor performansına ve egzoz emisyonlarına etkisi	39
3. DENEYSEL ÇALIŞMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA	43
3.1 Test Ekipmanları	43
3.2 Deneysel Yöntem	46
3.3 Deneysel Çalışma.....	50
3.3.1 Dizel yakıtı ile yapılan deneyler	50
3.3.1.1 EGR' nin motor gücü üzerindeki etkisi	50
3.3.1.2 EGR' nin özgül yakıt tüketimi üzerindeki etkisi	51
3.3.1.3 EGR' nin duman yoğunluğu üzerindeki etkisi.....	53
3.3.1.4 EGR' nin CO emisyonları üzerindeki etkisi	54
3.3.1.5 EGR' nin HC emisyonları üzerindeki etkisi	55
3.3.1.6 EGR' nin NO _x emisyonları üzerindeki etkisi.....	56

3.3.2 Dizel yakıtı ile yapılan deneylerde konvertör uygulaması.....	58
3.3.3 Soya yağı metil esteri ile yapılan deneyler	61
3.3.3.1 B20 deneyleri	61
3.3.3.2 B50 deneyleri	69
3.3.3.3 B100 deneyleri	76
SONUÇ	83
KAYNAKLAR	85
ÖZGEÇMİŞ	88

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	Açıklama
g	Yerçekimi ivmesi
P _x	x noktasındaki basınç
Q	Hacimsel debi
V _x	x noktasındaki akışkan hızı
z _x	x noktasının referans eksene göre yüksekliği
γ	Yoğunluk
λ	Hava fazlalık katsayısı
n	Motor devri (devir/dakika)

Kısaltmalar	Açıklama
EGR	Egzoz gazları resirkülasyonu
NO _x	Azotoksit
EOBD	Avrupa on-board diagnosu
PM	Partikül madde
NO ₂	Azotdioksit
N ₂ O ₃	Diazottrioksit
HC	Hidrokarbon
CO	Karbonmonoksit
HFK	Hava fazlalık katsayısı
SO ₂	Kükürtdioksit
CO ₂	Karbondioksit
SFME	Ayçiçek yağı metil esterleri
SYME	Soya yağı metil esterleri
DI	Direct Injection
MAK	Maksimum atmosfer konsantrasyonu
SCR	Seçici katalitik indirgeme
NAC	NO _x emici katalisti
DOC	Dizel oksidasyon katalisti
ÜÖN	Üst ölü nokta
AÖN	Alt ölü nokta
SOF	Dizel partikülü çözülebilir organik kısım
DPF	Dizel partikül filtresi
OBD	On-board diagnosu
DGT	Değişken geometrili turboşarj
ECU	Elektronik kontrol ünitesi
ppm	Milyondaki kısım

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1.	NO _x emisyonlarını kontrol etmede kullanılan yöntemler.....	14
Şekil 2.3.	Eşdeğerlik oranına bağlı olarak NO _x konsantrasyonu.....	18
Şekil 2.4.	Dolgu basıncının NO _x emisyonlarına etkisi	18
Şekil 2.5.	Dolgu sıcaklığının NO _x emisyonlarına etkisi	19
Şekil 2.6.	Türbülans oranının NO _x emisyonlarına etkisi	20
Şekil 2.7.	Sıkıştırma oranının NO _x emisyonlarına etkisi.....	20
Şekil 2.8.	SCR sistem komponentleri (BMW 2007)	22
Şekil 2.9.	Zengin karışım durumu (Fang 2007).....	23
Şekil 2.11.	Dizel oksidasyon katalistinin şematik yapısı.....	24
Şekil 2.12.	HC- NO _x yakalama katalizörünün yapısı ve çalışması.....	25
Şekil 2.13.	Yıllara göre emisyon azaltma teknolojilerindeki seçimler.....	29
Şekil 2.14.	Emisyon sınırlamasının Türkiye’ deki geçmişi	30
Şekil 2.15.	EGR çalışma prensibi.....	31
Şekil 2.16.	EGR sistemi çalışma mekanizması	33
Şekil 2.17.	EGR sistemi komponentleri	34
Şekil 2.18.	Yardımcı ekipmanlı dizel motor dizaynı.....	37
Şekil 2.19.	Temel EGR ve kısa hatlı ventürili EGR karşılaştırması.....	38
Şekil 2.20.	Ventürili Tip EGR sistemi.....	39
Şekil 2.21.	EGR oranının motor gücü, özgül yakıt tüketimi ve NO _x ’ lere etkisi	41
Şekil 2.22.	Değişik hızlardaki EGR karakteristikleri	42
Şekil 2.23.	EGR oranının motor yüküne bağlı değişimi.....	42
Şekil 3.1.	Deney düzeneği	47
Şekil 3.2.	Dizel yakıtı için farklı EGR oranlarındaki motor gücü değişimi	51
Şekil 3.3.	Dizel yakıtı için farklı EGR oranlarındaki özgül yakıt tüketimi	52
Şekil 3.4.	Dizel yakıtı için farklı EGR oranlarındaki duman yoğunluğu	54
Şekil 3.5.	Dizel yakıtı için farklı EGR oranlarındaki CO emisyonları.....	55
Şekil 3.6.	Dizel yakıtı için farklı EGR oranlarındaki HC emisyonları.....	56
Şekil 3.7.	Dizel yakıtı için farklı EGR oranlarındaki NO _x emisyonları	58
Şekil 3.8.	EGR+ katalist uygulamasının CO emisyonuna etkisi	59
Şekil 3.9.	EGR+katalist uygulamasının HC emisyonuna etkisi	60
Şekil 3.10.	EGR+katalist uygulamasının NO _x emisyonlarına etkisi	60
Şekil 3.11.	B20 yakıtı için farklı EGR oranlarındaki motor gücü	62
Şekil 3.12.	B20 yakıtı için farklı EGR oranlarındaki özgül yakıt tüketimi	63
Şekil 3.13.	B20 yakıtı için farklı EGR oranlarındaki duman yoğunluğu	65
Şekil 3.14.	B20 yakıtı için farklı EGR oranlarındaki CO emisyonu	66
Şekil 3.15.	B20 yakıtı için farklı EGR oranlarındaki HC emisyonu	67
Şekil 3.16.	B20 yakıtı için farklı EGR oranlarındaki NO _x emisyonu.....	69
Şekil 3.17.	B50 yakıtı için farklı EGR oranlarındaki motor gücü	70
Şekil 3.18.	B50 yakıtı için farklı EGR oranlarındaki özgül yakıt tüketimi	71
Şekil 3.19.	B50 yakıtı için farklı EGR oranlarındaki duman yoğunluğu	72
Şekil 3.20.	B50 yakıtı için farklı EGR oranlarındaki CO emisyonları.....	73
Şekil 3.22.	B50 yakıtı için farklı EGR oranlarındaki NO _x emisyonları	75
Şekil 3.24.	B100 yakıtı için farklı EGR oranlarındaki özgül yakıt tüketimi	78
Şekil 3.25.	B100 yakıtı için farklı EGR oranlarındaki duman yoğunluğu	79
Şekil 3.26.	B100 yakıtı için farklı EGR oranlarındaki CO emisyonları.....	80
Şekil 3.27.	B100 yakıtı için farklı EGR oranlarındaki HC emisyonları.....	81
Şekil 3.28.	B100 yakıtı için bağlı farklı EGR oranlarındaki NO _x emisyonları	82

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1.	NO _x emisyonunu azaltmada kullanılan yöntemlerin etkileri (Andrews1995)14
Çizelge 2.2.	Emisyonların Euro standartlarına göre değişimi 26
Çizelge 2.3.	LCV araçlar için Euro 4 Avrupa emisyon standartı limit değerleri (g/km)... 27
Çizelge 2.4.	LCV araçlar için Euro 5 Avrupa emisyon standartı limit değerleri (g/km)... 27
Çizelge 2.5.	Yıllara göre çeşitli ülkelerdeki yasal kükürt miktarları (ppm) 28
Çizelge 2.6.	Değişen Euro normlarını sağlamak için kullanılan farklı teknolojiler 29
Çizelge 3.1.	Deneylerde kullanılan motor parametreleri..... 44
Çizelge 3.3.	Deneyde kullanılan dizel yakıt özellikleri..... 45
Çizelge 3.4.	Duman ölçme cihazı hassasiyeti..... 46
Çizelge 3.5.	Dizel yakıtı için farklı EGR oranlarındaki motor gücü değerleri..... 51
Çizelge 3.6.	Dizel yakıtı farklı EGR oranlarındaki yakıt tüketimi değerleri..... 52
Çizelge 3.7.	Dizel yakıtı için farklı EGR oranlarındaki duman yoğunluğu 53
Çizelge 3.8.	Dizel yakıtı için farklı EGR oranlarındaki CO değerleri..... 55
Çizelge 3.9.	Dizel yakıtı için farklı EGR oranlarındaki HC değerleri..... 56
Çizelge 3.10.	Dizel yakıtı için farklı EGR oranlarındaki NO _x değerleri 57
Çizelge 3.11.	B20 yakıtı için farklı EGR oranlarındaki motor gücü değerleri..... 62
Çizelge 3.12.	B20 yakıtı için farklı EGR oranlarındaki özgül yakıt tüketimi 63
Çizelge 3.13.	B20 yakıtı için farklı EGR oranlarındaki duman yoğunluğu 64
Çizelge 3.14.	B20 yakıtı için farklı EGR oranlarındaki CO emisyonu değerleri 66
Çizelge 3.15.	B20 yakıtı için farklı EGR oranlarındaki HC emisyonu değerleri 67
Çizelge 3.16.	B20 yakıtı için farklı EGR oranlarındaki NO _x emisyonu..... 68
Çizelge 3.17.	B50 yakıtı için farklı EGR oranlarındaki motor gücü değerleri..... 70
Çizelge 3.18.	B50 yakıtı için farklı EGR oranlarındaki özgül yakıt tüketimi 71
Çizelge 3.19.	B50 yakıtı için farklı EGR oranlarındaki duman yoğunluğu 72
Çizelge 3.20.	B50 yakıtı için farklı EGR oranlarındaki CO emisyonları değerleri..... 73
Çizelge 3.21.	B50 yakıtı için farklı EGR oranlarındaki HC emisyonları değerleri..... 74
Çizelge 3.22.	B50 yakıtı için farklı EGR oranlarındaki NO _x emisyonları değerleri 75
Çizelge 3.23.	B100 yakıtı için farklı EGR oranlarındaki motor gücü değerleri..... 76
Çizelge 3.24.	B100 yakıtı için farklı EGR oranlarındaki özgül yakıt tüketimi 77
Çizelge 3.25.	B100 yakıtı için farklı EGR oranlarındaki duman yoğunluğu 78
Çizelge 3.26.	B100 yakıtı için farklı EGR oranlarındaki CO emisyonları 79
Çizelge 3.27.	B100 yakıtı için farklı EGR oranlarındaki HC emisyonları 80
Çizelge 3.28.	B100 yakıtı için farklı EGR oranlarındaki NO _x emisyonları..... 81

GİRİŞ

Taşıt kaynaklı emisyonların azaltılması konusundaki ilk çalışmalar 1968 yılında California' da başlamıştır. Avrupa Birliği 13 Ekim 1998 tarihinde tüm üye ülkelerin Euro-On-Board-Diagnosu (EOBD) kullanma zorunluluğunu getiren EU yönergesini kabul etmiştir. EOBD, egzoz gazı öncelikli yapı parçalarını, parça sistemlerini ve elektrikli bileşenlerini, bunların hatalı fonksiyonlarını veya devre dışı kalma durumlarını, tanımlanmış emisyon sınır değerlerini aşıp aşmama konusunda dizel motorlarının kontrolünü sağlar.

Dizel motorlarında yanma sonucu oluşan egzoz gazındaki kirleticilerin en önemlileri partikül madde (PM), azotoksitler (NO_x), hidrokarbonlar (HC) ve karbonmonoksit (CO)' tir (Şahin ve Erman 2006). Dizel araçlar, dizel motorların termal verimlerinin yüksek olması sebebiyle benzinli araçlardan daha az CO ve yanmamış HC çıkarırlar. Fakat PM ve NO_x emisyonları daha yüksektir (Jian ve ark. 2008). Dizel motorlarında sıkıştırılmalı yanma prosesi ile termal verimi daha yüksek bir motor elde edilir. Fakat sıkıştırılmalı yanma prosesi sonucu oluşan yüksek sıcaklık ile NO_x emisyon seviyesi artmaktadır. Benzin motorlarından atmosfere yayılan bir ton egzoz gazının 18,42 kg' ı NO_x iken, dizel motorlarında bu miktar 123,71 kg' a ulaşmaktadır (Saraçoğlu ve ark. 1977).

Partikül emisyonu seviyesinin azaltılabilmesi için yanmanın tam gerçekleşmesi gerekir. PM' nin sağlık etkileri, iklim değişikliği ve ekolojik etkiler gibi potansiyel çevresel etkileri yaygın bir şekilde tartışılmaktadır (Maricq 2007). Dizel PM' nin astım, kalıcı bronşit ve akciğer kanseri gibi sağlık problemlerine yol açtığından şüphelenilmektedir. Birkaç kuruluş dizel egzozunun bazı kısımlarının zehirli ve salgın hastalıklarla ilgisini olduğuna dair bilimsel görüş bildirmişlerdir ve dizel egzozu partikül kısmının potansiyel, muhtemel veya belirli insan kanserojeni olarak sınıflandırılmasını önermektedirler (Setten ve ark. 2001).

Dizel motorları, çalışma koşullarına bağlı olarak siyah, gri-beyaz ve mavi olmak üzere üç renkte duman yayarlar. Siyah duman, tam yanmamış yakıt zerreciklerinin oluşturduğu

aerosoldür ve yanma odasına gereğinden fazla yakıt verildiğini gösterir. İs, yanma odası içerisinde sıcaklığın yüksek olduğu bölgelerde oksijenin bulunmaması sonucu gaz yada sıvı fazındaki moleküllerin karbonlaşarak partiküllere dönüşmesi ile meydana gelmektedir. Gri-beyaz duman tam yanma artığı maddelerin oluşturduğu nemli aerosol olup, uygun yanma koşullarının varlığını gösterir. Mavi duman ise yanma odasından geçen yağlama yağının fazlalaşarak yanmaya katılması halinde görülür, genellikle motorun bakıma ihtiyacı olduğunu gösterir.

İçten yanmalı motorlarda yanma odasındaki sıcaklık 1800K' nin üzerine çıktığında, havanın içerisindeki azot ve oksijen kimyasal olarak birleşerek azot oksite dönüşür. Azot, sekiz farklı oksit oluşturmaya rağmen hava kirliliği bakımından NO (azotmonoksit) ve NO₂ (azotdioksit) en önemlileridir (EPA 600/8-82-06 1982). Dizel motorlarında yanma sonucu, içinde azotoksitin de bulunduğu egzoz emisyonları oluşur. Azotoksitin hacimce yaklaşık % 90' ı NO, % 5' i NO₂, ve kalan % 5' i N₂O (diazotmonoksit), N₂O₃ (diazottrioksit) ve N₂O₅' ten (diazotpentaoksit) oluşur. Çevre şartlarında NO-NO₂ dengesi NO₂ oluşturacak yöndedir. Egzoz gazlarının akış hızının yavaş olması durumunda dizel egzozundaki NO, NO₂' ye dönüşecektir (Borat ve ark. 1994). NO_x' ler, karbonmonoksitler gibi kandaki hemoglobin ile birleşmektedir. Akciğer dokusunda hasara ve felce neden olabilir. Fotokimyasal sis oluşumunu etkilemektedir. Atmosferdeki su ile birleşerek asit yağmuru oluşumunu tetikler, toprağa ve bitkilere zarar verir. Havada oksijenle birleşerek NO₂ oluşturur. NO₂ akciğerlerde nemle birleşerek nitrik asite dönüşür, zamanla akciğerlerde birikerek akciğer ve solunum yolu hastalıklarına yol açar. NO_x emisyonları ile ilgili olarak yapılan bir çalışmada 150 ppm ve üzerindeki NO_x' in ölümcül etkisi olduğu belirtilmiş, 300 ppm ve üzerindeki konsantrasyonlarda ise göğüs ve boğaz ağrısını takiben akciğer ödeminden ölümün gerçekleştiği belirtilmiştir (Watanabe ve ark 1997).

Taşıt kaynaklı kirleticiler incelendiğinde, içten yanmalı motorlarda yanma sırasında yakıt içindeki hidrokarbonların, hava içindeki oksijen ile birleşerek çeşitli bileşikler oluşturdukları ve egzoz ile dışarı atılan bu bileşiklerin % 99' unun su, azot, oksijen ve karbondioksit gibi gazlardan oluştuğu görülür. Egzoz gazının bileşiminin geri kalanını

oluşturan çevre ve insan sağlığına zararlı bileşiklerin ise, normal koşullarda egzoz gazlarının sadece % 1' ini oluşturduğu belirlenmiştir.

Emisyon oluşumunda en önemli faktörlerden birisi de motorların işletme şartlarıdır. Motorun kendi iç sürtünmelerini yenecek şekilde minimum devir sayısında çalıştığı rölanti durumunda (devir sayısı 700-900 d/d), HFK (Hava Fazlalık Katsayısı) <1 şartları mevcuttur. Bu şartlarda eksik yanma, soğuk cidarlar ve düşük basıncın oluşturduğu düşük yanma hızından dolayı, HC ve CO değerleri yüksektir. Şehir içi eğimli yollarda aşağı doğru yol alındığında, virajlarda yapılan yavaşlama ile silindir içinde motor hızına bağlı bir vakum meydana gelir. Silindire gönderilen havanın azalması ile oluşan fakir karışım, buji çıktığında alev cephesi oluşturamaz. Dolayısı ile egzozu yanmamış HC gönderir. Ayrıca eksik yanma nedeniyle CO emisyonları da bu aşamada oldukça yüksektir. İvmelenme aşamasında içeriye yakıt/hava karışımı girmektedir. Devir sayısının artması ve zengin karışım özellikleri nedeniyle artan basınç ve sıcaklık etkisiyle NO_x' ler yoğundur. Normal seyir halinde iken (90 km/h sabit hızda) HFK>1 olduğunda HC ve CO' ler daha az, NO_x' ler daha yoğundur.

Karbonmonoksit (CO): Renksiz, kokusuz ve tatsız bir gaz olan CO zehirlenmelere ve ölümlere yol açabilir. Karbonmonoksitin, kandaki oksijeni taşıma görevine sahip olan hemoglobine bağlanma yeteneği oksijene göre 200 kat daha fazladır. Rölanti ve yavaş seyir halinde araçlarda zengin karışımdan dolayı CO emisyonu artar. Yakıtın eksik yanması nedeniyle ortaya çıkar. Çok zehirlidir, havadaki % 0,3 sınır değeri aşıldığında boğularak ölümlere yol açar. Atmosferde CO₂' ye dönüşür.

Hidrokarbonlar (HC): Yakıtın, silindirde bir çok etkenden ötürü tam yanmamasından kaynaklandığı gibi taşıtların yakıt deposundan da atmosfere karışmaktadır. HC' lar genellikle kötü kokulu ve tahriş edicidirler. Parafin ve olefin türü HC' lar solunum yolu tahriş edici, aromalar kanser yapıcı, aldehitler ise keskin kokusundan dolayı göz ve burun için rahatsız edici etkiye sahiptirler. Gaz halindeki HC' lar güneş ışığı altında azot oksitlerle birleşerek fotokimyasal sis-smog oluştururlar. Güneş ışığında oluşan "fotokimyasal sis" bitkiler için son derece zararlıdır.

Kükürtdioksit (SO₂): Renksiz ancak rahatsız edici kokuludur. Yakıtta bulunan kükürtün hava ile birleşmesinden oluşur. Solunum yolları, akciğer ve karaciğer hastalıklarına neden olmaktadır. Ayrıca atmosferdeki su buharı ile birleşerek insan sağlığı ve çevre için tehlikeli asit bileşiklerini oluşturur.

Partikül (PM): İs veya duman olarak tanımlanırlar. Yanmamış karbon parçacıklarıdır ve özellikle dizel araçlarda oluşmaktadır. İs, zararlı bileşenleri bünyesinde taşıyarak ve solunum sisteminde birikerek insan sağlığına zarar vermektedir. Japon Ulusal Çevre Araştırmaları Enstitüsünün yapmış olduğu bir çalışmada, dizel motorlarının ürettiği siyah duman kobay olarak kullanılan farelere enjekte edilmiştir. 0,6 mg enjekte edildiğinde kobayların yarısı, 0,9 mg enjekte edildiğinde ise kobayların tamamının öldüğü belirlenmiştir (Watanabe ve ark 1997).

Kurşun bileşikleri: Benzine yakıtın oktan sayısını artırmak amacı ile eklenen kurşun tetraetil gibi katkı maddeleri atmosfere karışarak solunduğu zaman vücut ve beyin için zehirleyici bir maddeye dönüşür. Benzinde vuruntuya karşı direnç oluşturmak amacıyla kurşun tetra etil katkı maddesi olarak kullanılır. Egzoz gazında oluşan kurşun bileşikleri çökelerek toprağı kirletir, canlılarda doku, kan dolaşımı ve sinir sisteminde tahribata yol açar. AB ülkelerinde 1985 yılından bu yana, ülkemizde ise 1993 yılından başlanarak, tüm otomobiller yalnızca kurşunsuz benzin kullanımına uygun şekilde üretilmektedir.

CO₂: “Global kirletici” olarak tüm atmosferde “sera gazı” oluşumundan, küresel ısınmadan ve iklim değişikliğinden sorumludur.

Azotoksit (NO_x): Azot renksiz, kokusuz ve tatsız bir gaz olup motordaki yüksek yanma sıcaklığı sonucu oluşmaktadır. NO, havanın oksijeni ile birleşerek NO₂' ye dönüşür. Kahverengi ve kokulu bir gaz olan NO₂, motor içindeki yüksek sıcaklıktan ötürü oluşmaktadır.

Egzoz emisyonların azaltılması konusundaki başlıca uygulamalar; motor tasarımındaki iyileştirmeler, yakıt ön işlemleri, yanma işleminin daha iyi ayarlanıp daha basit hale getirilmesi, yakıt formülünün modifikasyonu, alkoller ve esterler gibi fosil olmayan

alternatif yakıt kullanımı ve yanma sonrası cihaz kullanımı şeklinde belirtilebilir (AECC review 2009). Sadece motorlarda yapılacak bu düzenlemeler PM ve NO_x emisyonlarını yasal sınırlara çekemediğinden dizel egzoz emisyonlarının eş zamanlı olarak düşürülmesi için yanma sonrasında kullanılmak üzere cihazlar geliştirilmektedir (Jian ve ark. 2008).

Bu kapsamda egzoz emisyonlarının azaltılmasında kullanılan etkili bir yöntem olan EGR ile ilgili geçmiş çalışmalar 2. bölümde, teorik bilgiler 3. bölümde, EGR' nin katalitik konvertörlü ve konvertörsüz dizel yakıtı ve EGR' li konvertörsüz değişik oranlardaki soya yağı metil esteri kullanılması durumundaki motor performansı ve egzoz emisyonları üzerindeki etkisi ise deneysel olarak 5. bölümde incelenecektir.

1. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Desantes ve ark. (2000) tarafından yapılan çalışma, emme basıncının artırılması ile soğutulmuş EGR' yi birleştiren bir parametrik çalışma temeline dayanan ve DI dizel yanma işlemine EGR' nin etkisini inceleyen bir analizdir. Her işletme koşulu için püskürtülen yakıt miktarı sabit tutulmuştur. Bu çalışma için kullanılan motor, 1,8 lt hacminde, tek silindirli, 123 mm silindir çapı, 156 mm strok ve 16,3 sıkıştırma oranına sahip, 130 MPa enjeksiyon basıncına kadar çıkabilen Common Rail enjeksiyon sistemi ile donatılmış, silindir başına 4 valfli bir dizel motordur. Aşırı doldurma özelliği eklemek amacıyla motor girişinde dış soğutucu kullanan bir vidalı kompresör tarafından basınçlı hava sağlanmaktadır.

Testlerde seçilmiş 5 işletme durumu dikkate alınmıştır. Her biri için EGR oranı (% 0-30) ve emme basıncı bağımsız olarak değiştirilerek uygulanmıştır. Bu çalışmada kullanılan EGR oran formülü;

$$EGR\% = \frac{(CO_2)_{EMME} - (CO_2)_{ATM}}{(CO_2)_{EGZOS}} \times 100, \quad (CO_2)_{ATM} : \text{İhmal edilebilir.} \quad (1.1)$$

$$= \frac{(\text{CO}_2)_{\text{EMME}}}{(\text{CO}_2)_{\text{EGZOS}}} \times 100 \text{ ' d\u00fcr.} \quad (1.2)$$

Yapılan analizler sonucu EGR artışı ile NO_x emisyonları lineer olarak azalırken, is ve CO₂ emisyonlarının arttığı görülmüştür. Yüksek EGR oranlarında bu artış daha önemli değerlere ulaşmaktadır. Taze dolgu havası basıncı artışının, NO_x emisyonlarına dikkate değer bir etkisi olmamış fakat is ve CO emisyonlarını azaltmıştır. Bütün işletme koşullarında, maksimum yanmış gaz sıcaklığının aslında NO_x emisyonlarını kontrol ettiği görülmüştür. Is emisyonları ile yanmış gaz sıcaklığı, yanma sonu oksijen kısmi basıncı ve silindir içi basıncı arasında bir korelasyon sağlanamamıştır. Bu sonuç EGR'nin is oluşumundan çok is oksidasyonunu etkilemesi olarak yorumlanmıştır. Bütün işletme koşullarında yanma süresi ile enjeksiyon süresi, silindir içi dolgu yoğunluğu ve oksijen konsantrasyonu oranı arasında korelasyon sağlanmıştır.

Lundquist ve ark. (2000) tarafından hazırlanan bir diğer çalışmada ise yüksek emişli motorlar için uzun tur (LR) ve kısa tur (SR1, SR2) EGR hattı kullanılarak yeterli hava ve egzoz gazı naklinin minimum performans düşüşü ve yakıt tüketimi ile sağlanıp sağlanamadığı araştırılmıştır. Kullanılan motor 5.5 lt hacminde, 6 silindirli, düz yakıt pompalı, maksimum tork 590 Nm, devir 2200 d/d ve gücü 108 kW olan bir dizel motordur. LR sisteminde egzoz gazını resirküle etmek için emme havası filtresindeki basınç düşüşü kullanılmaktadır. EGR oran kontrolü için EGR hattına bir valf yerleştirilmiştir. SR1 sisteminde, kompresör difüzöründeki yüksek hız ve alçak basınç avantajı kullanılır. Bu sayede egzoz manifoldundan kompresöre bir EGR akışı sağlanır. Bu sistemde ihtiyaç duyulan iç soğutucu ile hem taze dolgu havası hem de egzoz gazları soğutulup kontrol altına alınmıştır. Yine EGR oran kontrolü için EGR hattına bir valf yerleştirilmiştir. SR2 sisteminde ise taze hava iç soğutucu çıkışına yerleştirilmiş bir ventüriden geçirilmiştir. Bu ventüri içindeki yüksek hız düşük statik basınç meydana getirir ve bu düşük basınç egzoz gazlarının egzoz manifoldundan ventüriye akışını sağlar. Değişik tork ve hız koşullarında, EGR oranını ayarlamak için 2 yol kullanılmıştır. Birincisinde bir miktar hava ventüri arkasına by-pass edilmiş, ikincisinde ise değişken nozul türbini kullanılmıştır. Bu sistemde taze dolgu havası ve egzoz gazları

için iki ayrı soğutucu kullanılmıştır. Bu çalışmada kullanılan EGR oran formülü aşağıda verilmiştir.

$$\text{EGR \%} = \frac{\dot{m}_{\text{EGR}}}{\dot{m}_{\text{EGR}} + \dot{m}_{\text{HAVA}}} \times 100 \quad (1.3)$$

Testler sonucu bütün EGR sistemlerinde önemli oranlarda iyileşme sağlanmıştır. SR2 ve SR1, LR' ye ve SR2 ise SR1' e göre daha verimli çıkmıştır. Fakat SR1 sistemi kontrol edilmesi ve uygulanması daha kolay ve mali açıdan daha elverişlidir. EGR sistemi bir partikül tutucusu ile birleştirildiğinde hem düşük partikül hem de düşük NO_x emisyonları elde edilmiştir.

Matarelli ve ark. (2000) tarafından hazırlanan başka bir makalede 2,5 lt, silindir başına 4 supaplı, aşırı doldurmalı ve direkt püskürtmeli dizel motorunun optimizasyonu için uygulanmış deneysel ve nümerik çalışmalar bulunmaktadır. Optimize edilmiş işletme noktalarının tamamı bütün test sürüş çevrimi boyunca ECU' nün ön kalibrasyonu için temel oluşturmuşlardır. Çalışmada kullanılan EGR oran formülü;

$$\text{EGR \%} = \frac{\dot{m}_{\text{HAVA(EGRsiz)}} - \dot{m}_{\text{HAVA(EGRli)}}}{\dot{m}_{\text{HAVA(EGRsiz)}}} \times 100 \quad (1.4)$$

Deneysel soğutmalı ve soğutmasız EGR konfigürasyonları için yapılmıştır. EGR soğutması özellikle yüksek yüklerde NO_x emisyonlarını iyileştirici etkide bulunmuştur. Dikkate alınan koşullarda, EGR oranının optimizasyonu, NO_x emisyonlarında önemli bir azalma sağlamıştır. Soğutmasız durumda ortalama azalma % 28 iken, soğutmalıda bu değer % 35' e çıkmaktadır. EGR valfi, aşırı doldurma hızını, dolgu basıncını ve emme valfinden geçen gaz akışını azaltan bir emniyet valfi gibi çalışır. Analiz edilen bütün işletme koşulları için hava/yakıt oranı tam yükte karşılık gelen değerden daha yüksek bulunmuştur.

Haşimoğlu ve ark. (2002) tarafından Gazi Ünivesitesinde yapılan çalışmada dört zamanlı ve tek silindirli direkt püskürtmeli dizel motoru kullanılmıştır. Deneyle tam yük konumunda, enjektör püskürtme basıncı 275 bar, püskürtme avansı ise 18° de sabit tutularak EGR' li (% 10, 20 ve 30) ve EGR' siz olarak yapılmıştır. Deneylede yakıt olarak 46 setan sayılı motorin kullanılmıştır.

Motor devri sayısına bağılı olarak her bir EGR oranı için seçilen parametrelerdeki değışimler incelenmiştir. Deneyle esnasında incelenen parametreler; güç, ortalama efektif basınç, özgül yakıt tüketimi, duman yoğunluğu ve azotoksit emisyonlarıdır. Deneylede (1.5)' deki EGR oran formülü kullanılmıştır.

$$EGR\% = \frac{(CO_2)_{emmanifoldu} - (CO_2)_{cevre}}{(CO_2)_{egzozmanifoldu}} \times 100, \quad (1.5)$$

Yapılan deneyleler sonucunda EGR uygulaması ile NO_x dışındaki parametrelerde kötüleşme gözlenmiştir. Tüm parametreler dikkate alındığında ideal EGR oranı % 10 olarak bulunmuştur. Motor gücünün ve özgül yakıt tüketiminin kötüleşmesinde aynı faktörler etkili olmuştur. Yüksek devirlerde artan EGR oranına bağılı olarak karışımın çok fakirleşmesi yanmanın kötüleşmesine yol açmaktadır. Yanma hızının düşmesi maksimum ısının açığa çıktığı noktayı geciktirdiği için maksimum silindir sıcaklığı azalmakta ve azotoksit emisyonları düşmektedir. Yüksek EGR oranlarında yanma hızının çok düşmesi ve yüksek devirlerde avansın yetmemesi sonucu yanma şartlarının kötüleşmesi de NO_x emisyonlarını iyileştirmektedir.

Usta ve ark. (2006) tarafından yapılan çalışmada kullanılmış ayçiçeğı yağından metil esterleştirme yöntemiyle biyodizel üretilmiştir. Üretilen biyodizel dizel yakıtı ile farklı oranlarda karıştırılarak 4 zamanlı, 4 silindirli indirekt püskürtmeli bir dizel motorunda güç, özgül yakıt tüketimi, termik verim, yağlama yağı sıcaklığı, egzoz gazı sıcaklığı, CO, NO_x, SO₂ ve duman emisyonları bakımından karşılaştırılmıştır. Biyodizelin ısıl değeri dizel yakıtından düşük olmasına rağmen, motor gücünde ve torkunda belirgin bir değışim gözlenmemiştir. Biyodizel karışım oranının artmasıyla özgül yakıt tüketiminde artış elde edilmiştir. Buna ilaveten, CO, SO₂ ve duman emisyonlarında azalma ve NO_x emisyonunda ise artış tespit edilmiştir.

Alpgiray ve Gürhan (2007) tarafından yapılan çalışmada, kanola yağının dizel motoru performansına ve emisyon karakteristiklerine etkileri araştırılmıştır. Deneyle direkt püskürtmeli, 5,5 kW gücünde 4 zamanlı bir dizel motor kullanılarak iki ana bölümde gerçekleştirilmiştir. Birinci bölümde kanola yağı dizel yakıtına hacimsel olarak % 20, 40, 60, 80 oranlarında karıştırılarak emisyon ve motor deneyleri yapılmıştır. İkinci bölümde ise, transesterifikasyon ile kanola yağı metil esteri elde edilmiş, emisyon ve motor deneyleri aynı şartlarda tekrarlanmıştır. Deneyle devir sayılarına bağlı olarak, dönme momenti, emisyon değerleri ve yakıt tüketim değerleri ölçülmüştür.

Sonuç olarak kanola yağı kullanımı ile motor momenti ve gücünde dizel yakıtına oranla düşüş meydana geldiği, yağ asidi metil esteri kullanımı ile moment ve gücün ham kanola yağlarına oranla daha yüksek olduğu ve dizel yakıtına daha yakın olduğu belirlenmiştir. Transesterifikasyon yönteminin kanola yağına uygulanması sonucu bitkisel yağların viskozitelerinin ve özgül ağırlıklarının azaldığı belirlenmiştir.

Kanola yağı ile yapılan testlerde duman koyuluğunun dizel yakıtına oranla daha yüksek olduğu, fakat yağ asidi metil esterinin kullanımı ile duman yoğunluğunun seyreltme yöntemi ile elde edilen yakıtlara oranla daha düşük olduğu belirlenmiştir. Karışım ve metil ester yakıtların CO₂, CO ve O₂ değerleri de belirlenmiştir. Sonuç olarak ham kanola yağı ve metil esterinin dizel motorlarda yakıt olarak kullanılabilmesi ancak kanola yağı metil esterinin dizel yakıtına daha yakın değerlere sahip olduğu görülmüştür.

Rajan ve Kumar (2009) tarafından yapılan bu çalışmada ise alternatif yakıt kullanılan bir dizel motorunda EGR' nin egzoz emisyonları üzerindeki etkisi incelenmiştir. Bitkilerden elde edilen biyodizel yakıtlar PM, CO ve HC emisyonlarını, yakıt tüketimini ve motor performansını kötüleştirmeden azaltabilmektedir ancak NO_x emisyonlarında bir miktar artışa neden olmaktadır. Çalışmanın amacı biyodizel yakıt kullanan bir dizel motorunda NO_x emisyonlarının EGR kullanılarak ne oranda azaltılabileceğini saptamak ve dizel yakıt kullanan aynı özelliklerdeki motora ait emisyonlarla karşılaştırma

yapmaktır. Deneyle 1500 devir/dakikada ve aşağıdaki EGR oran formülü kullanılarak yapılmıştır.

$$\text{EGR}(\%) = \frac{Q_{\text{EGZOZ(EGR'SİZ)}} - Q_{\text{EGZOZ(EGR'Lİ)}}}{Q_{\text{EGZOZ(EGR'SİZ)}}} \times 100 \quad (1.6)$$

Deneylede kullanılan motor, çift silindirli dört zamanlı, su soğutmalı, 80 mm silindir çapı, 110 mm strok ve 16,5 sıkıştırma oranına sahip, biodizel yakıt (Sunflower methyl ester, SFME) kullanan DI (direct injection) bir dizel motordur.

Yapılan testler sonucunda SFME yakıtı kullanılan motordaki NO_x emisyonlarının % 15 EGR durumunda, dizel yakıt kullanılan EGR' siz motora göre % 20-25 oranında azaldığı görülmüştür. HC ve CO emisyonlarının ise, dizel yakıt kullanılan % 15 EGR' li motora göre sırasıyla % 5-% 10 oranında daha az olduğu saptanmıştır.

2. MATERYAL VE YÖNTEM

2.1 NO_x Emisyonları ve EGR

NO, NO₂, N₂O₂ ve benzeri bileşiklerin tümü NO_x olarak tanımlanmaktadır. Azot oksitler, kandaki hemoglobin ile birleşmektedir. Ciğerlerdeki nemle birleşerek nitrik asit oluştururlar. Oluşan asit miktarının az olması nedeniyle etkisi de azdır. Ancak zamanla birikerek solunum yolu hastalıkları bulunan kişiler için tehlike oluşurmaktadır (Ergeneman ve ark. 1998). Ayrıca NO_x' ler aerosol ve fotokimyasal duman oluşumu ile ozon tabakasının tahrip olmasına yol açmaktadırlar (Kaytakoğlu 1995). Azot oksitler içinde NO, kokusuz bir gazdır. Akciğerlerin çalışmasını bozar, mukoza zarını tahriş eder ve felç yapıcı etkisi vardır. Nitrik asit oluşumuna sebep olur. Çevre şartlarında kararsızdır ve oksijenle birleşerek NO₂' ye dönüşür. MAK değeri 9 mg/m³, tür (Schafer 1995).

2.1.1 NO_x oluşumu

Bütün fosil yakıtların yakılması sonucunda azot oksitler (NO_x) oluşmaktadır. Yanma ürünü olarak azot oksitlerin derişimi en yüksek bileşeni azotmonoksit (NO) ve azot dioksittir (NO₂). Genelde stokiyometrik orana yakın hava yakıt karışımlarında yanma sırasında NO oluşur. NO oluşumunu arttıran parametreler gaz sıcaklığı ve oksijen konsantrasyonudur. İçten yanmalı motorlarda yanma odasındaki sıcaklık 1800K' nin üzerine çıktığında, havanın içerisindeki azot ve oksijen kimyasal olarak birleşerek, azot oksit denilen, insan sağlığına ve çevreye zararlı bir gaz haline dönüşür. NO₂' nin atmosferde 118 ile 156 µg/m³ seviyesinde 6 aylık bir periyod boyunca bulunması halinde insan sağlığı üzerinde önemli zararlar yarattığı tespit edilmiştir (Borat ve ark. 1992). Azotun birçok oksitleri arasında NO ve NO₂ etkili birer kirletici iken azotoksitül (N₂O) ise kirletici değildir. NO_x terimi NO ve NO₂' nin atmosferdeki toplam konsantrasyonunu gösterir. Fosil yakıtların yanmasında NO_x oluşum mekanizması üç grupta toplanabilir:

1. Termal NO_x oluşumu
2. Yakıt kaynaklı NO_x oluşumu
3. Ani NO_x oluşumu

2.1.1.1 Termal NO_x oluşumu

Termal NO_x oluşumu 1200°C' nin altında daha az olmakla beraber, 1400 °C ve üzeri sıcaklıklarda artmaktadır (Ailen 1990). Burada esas alev sıcaklığının, adyabatik alev sıcaklığının altına düşmesi ile termal NO_x oluşumunun azalmasıdır. Adyabatik alev sıcaklığı, bir yanma işlemi sonunda elde edilebilecek maksimum sıcaklıktır ve teorik hava miktarı ile tam yanmada adyabatik alev sıcaklığı maksimum olur (Öztürk ve ark. 1993). Termal NO_x oluşumunun en etkin şekilde azaltılması, yanma odası ve yakıcıdaki alev sıcaklığı ve stokiyometrik oranların lokal olarak kontrol edilmesi ile mümkündür.

Stokiyometrik karışımın bir miktar fakir tarafında ($\lambda=1-1,1$) NO oluşumu maksimum iken, karışım zenginleşip fakirleştikçe NO miktarı da azalır (Heywood 1998). NO_x' ler

yanmalı sistemlerden atmosfere % 92-98 NO ve % 2-8 NO₂ olarak atılmaktadır (Borat ve ark. 1992). Atmosferdeki NO' nun dönüşümü $2NO + O_2 \leftrightarrow 2NO_2$ reaksiyonuna göre olmaktadır ve 1 ppm NO halinde % 50 dönüşüm için gerekli zaman 100 h dir. Ancak ortamda O₃ mevcut ise NO ve O₃' ün konsantrasyonları 0,1 ppm bile olsa dönüşüm için gerekli zaman 20 s kadar olmaktadır.

Yanma olaylarında oluşan Termal NO için Zeldovich mekanizmasına göre $O_2 \leftrightarrow 2O$ oluştuğunda zincir teşkil eden serbest radikallerde NO doğmaktadır.



Bu arada alevin son yanma bölgesinde NO teşekkülü başlamadan önce esas yanma reaksiyonlarının dengeye ulaştığı kabul edilebilir. Yukarıdaki mekanizma HFK' nın 0,8' den büyük olan zenginlikte veya fakir karışımlar için geçerlidir. $HFK \leq 0,8$ ise ilave olarak;



reaksiyonu önem kazanmaktadır (Borat ve ark. 1994).

Alev içerisinde O₂' nin ayrışması ile serbest kalan oksijen atomları azot molekülleri ile zincirleme reaksiyona girer (Türk 1998). Zeldovich reaksiyon mekanizmasının hız ifadesi, yanma bölgesindeki stokiometrik orana, yakıt-hava oranına, alev sıcaklığına ve alev sıcaklığına maruz kalma süresine bağlıdır (EPA 1991).

2.1.1.2 Yakıt kaynaklı NO_x oluşumu

Yakıt kimyasal olarak bağlı azot bileşiklerinin oksidasyonu sonucu, yakıt kaynaklı azot monoksit oluşmaktadır. Yakıttaki azotlu organik bileşiklerin miktarının artmasıyla yakıt kaynaklı azotmonoksit oluşumu da artmaktadır. Yakma havasında bulunan moleküler azot çok karardır ve bu molekülün bağ parçalama enerjisi 940 kJ/mol' dür. Yakıt içerisindeki azot için ise bağ parçalama enerjisi 250-627 kJ/mol arasında değişmektedir.

Yakıtta bağı azotun aktivasyon enerjisi moleküler azota göre oldukça düşük olduğu için oksijenle, sıcaklığa bağı olmaksızın hızla birleşebilmektedir. Yakıt kaynaklı NO_x oluşumu, yakıtın karakteristiği dışında stokiyometrik orana da bağıdır (EPA 1991). Yakıt kaynaklı azot oksit oluşumunda yakıt/hava oranı çok önemli bir parametredir. Oranın düşük olduğu stokiyometrik şartlarda yüksek miktarda, zengin alev şartlarında ise düşük miktarda azotmonoksit oluşmaktadır. Yakma ünitesinde alev önünde oluşan azotlu bileşikler kararsız halde bulduklarından “yakıtca zengin” koşullarda nitrojen oluşurken, bol hava koşullarında NO şeklinde okside olabilmektedir.

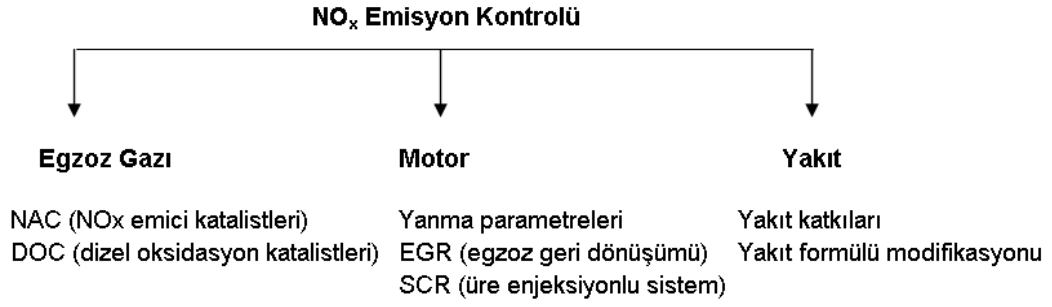
2.1.1.3 Ani NO_x oluşumu

Hidrokarbon yakıtların yanmasında azotoksitlerin oluşum hızları, özellikle zengin karışım bölgesinde ısı-NO mekanizmasında tanımlanan azotun oksitlenme hızını aşmakta ve çok hızlı bir şekilde, ani-NO oluşumu gerçekleşmektedir. Bu oluşumda özellikle (CH, CH₂) gibi hidrokarbon radikallerinin önemli rol oynadığı, bunların moleküler azotla hızlı bir tepkimeye girerek amin ve siyanid gibi ara ürünler üzerinden zincirleme reaksiyon ile NO oluşumuna neden olduğu belirtilmektedir (Miller 1989).

Yakma havasındaki moleküler azotun, serbest hidrokarbon radikalleriyle tepkimeye girmesi sonucu azotmonoksit oluşmaktadır (prompt NO). Oluşan HCN, serbest OH radikaliyle birleşerek CN' ye, CN ise daha sonraki kademelerde azotmonoksite oksitlenmektedir. Ani NO_x oluşumuna sıcaklığın etkisi zayıftır ancak oksijen fazlasının bulunduğu zengin yanma koşulları azotoksit oluşumunu teşvik etmektedir (Velzen 1991).

2.1.2 Dizel motorlarında NO_x kontrol yöntemleri

Dizel motorlarında azotoksit emisyonlarını kontrol etmek için kullanılan çeşitli yöntemler Şekil 2.1' de gösterilmiştir. Bu yöntemler temel olarak; yanma sonrasında egzoz gazında alınan önlemler, yakıtlarda yapılan değişiklikler ve motor parametrelerinde yapılacak değişiklikler olmak üzere üç ana grupta toplanabilir.



Şekil 2.1. NO_x emisyonlarını kontrol etmede kullanılan yöntemler

Dizel motorlarında NO_x emisyonlarını azaltmada kullanılan bazı yöntemlerin etkileri Çizelge 2.1’ de gösterilmiştir. Sadece EGR uygulaması ile NO_x emisyonlarında % 75’ lik bir azalma elde edilebilmektedir. Tüm yöntemler ve katalitik konvertör kullanılarak ise NO_x emisyonlarında % 95’ lik bir azalma sağlanabilmektedir.

Çizelge 2.1. NO_x emisyonunu azaltmada kullanılan yöntemlerin etkileri (Andrews1995)

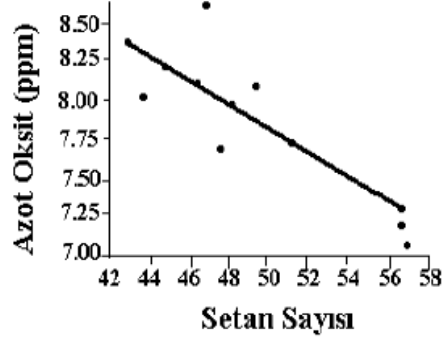
NO _x Emisyonu	
Standart ayar (%100)	100%
Sıkıştırma Oranın Artırılması	80%
Püskürtme Avansının Azaltılması	55%
Su Püskürtülmesi	30%
EGR	25%
EGR+Su Püskürtülmesi	20%
Tüm Yöntemler+Katalitik Konvertör	5%

2.1.3 Yakıtın NO_x emisyonlarına etkisi

Dizel yakıtında en önemli özellik setan sayısıdır. Setan sayısı yakıtın dizel motorunda sıkıştırma sonucu ısınan havanın içinde kendi kendine tutuşma özelliğini belirleyen bir sayıdır. Şekil 2.2’ de setan sayısının NO_x emisyonları üzerindeki etkisi görülmektedir.

Setan sayısının fazla olması tutuşma gecikmesi periyodunu azaltmakta ve yanma odasında biriken yakıtın ani yanması ile oluşan hızlı basınç artışını önlemektedir. Yakıt daha erken tutuşarak yanmaya başlayacaktır. Fakat bu sırada sıkıştırma devam ettiği için silindir içi sıcaklık ve buna bağlı olarak NO_x oluşumu artacaktır. Bu yüzden yanma

başlamadan önce daha az yakıt püskürtülmelidir. Böylece üst ölü nokta (ÜÖN) civarında yanan yakıt miktarı azalacağı için maksimum yanma sıcaklığı düşecektir (İlkılıç ve ark. 2009).



Şekil 2.2. Setan sayısının NO_x emisyonları üzerindeki etkisi

2.1.4 Motor parametrelerinin NO_x emisyonlarına etkisi

Dizel motorlarında oluşan NO_x emisyonlarını azaltmak için bazı temel parametrelerden yararlanır. Yakıt enjeksiyon sistemi özellikleri hava ile yakıtın karışması ve yanmasına etki eder. Çalışma şartlarında alevin oluşumu ve yayılması, yakıtın atomizasyonu ve yakıt dağıtımını, enjeksiyon sistemi özelliklerinden etkilenir. Tutuşma gecikmesi süresince püskürtülen yakıtın azaltılması NO_x emisyonlarını azaltır. Bunun için enjektör delik çapı küçültülerek, püskürtme süresi uzatılmakta ve pilot yakıt miktarı azaltılmaktadır. Bu durumda yakıt ile hava daha iyi karışacağından kullanılan hava miktarı artar ve alev daha geniş bir bölgeye yayılır. Sonuçta NO_x emisyonlarında artış görülür. Püskürtülen yakıt miktarının azaltılması ile NO_x emisyonlarında elde edilen azalma bu nedenden dolayı dengelenecek ve NO_x emisyonlarında bir değişim gözükmeyecektir. Bunun için püskürtme basıncı artırılarak ve setan sayısı daha fazla olan yakıt kullanılarak, tutuşma gecikmesi kısaltılmalıdır.

Dolum havası içindeki oksijen miktarı azaldıkça CO emisyonları artacaktır. Oksijen miktarı çok azalmadıkça EGR yakıt ekonomisini büyük oranda kötüleştirmeyecektir. Aşırı EGR hava yakıt oranını bozacağından PM ve is emisyonları artar. Silindirlere geri gönderilen egzoz gazları soğutulmuş ya da püskürtme basıncı artırılarak PM ve is oluşumu azaltılabilmektedir.

Püskürtme avansının değiştirilmesi, fakir ya da zengin yanma, sıkıştırma oranının değiştirilmesi, emme supabı özellikleri (silindir başına düşen supap sayısı, emme kanalı şekli ve uzunluğu, girdap oluşumu vb.) ve ön yanma odası gibi özellikler motordaki yanma işlemine etki eden önemli parametrelerdir.

Ana enjeksiyon avansının artışı yanma odası sıcaklığını artırır. Dolayısı ile NO_x emisyonlarını arttırıcı etkisi vardır. Enjeksiyonun daha küçük fazlara bölünmesi NO_x üretimini azaltır. Öncül Enjeksiyonun etkisi avans gibidir.

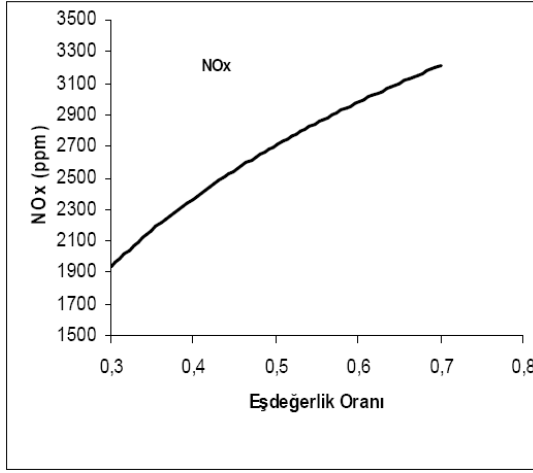
Oksijen konsantrasyonu : Karışım içindeki oksijen konsantrasyonu arttırıldıkça PM ve yanmamış HC emisyonları azalır. % 2' lik bir oksijen ilavesi ile is emisyonları neredeyse sıfır olur, yakıt tüketimi iyileşir. Fakat oksijen konsantrasyonunun arttırılması NO_x emisyonlarını arttırmaktadır. Oksijen konsantrasyonunun arttırılması tutuşma gecikmesini kısaltır. Bu durum püskürtme avansının azaltılmasına imkan sağlar. Avansın azaltılması ile NO_x emisyonları azalır. Avansın 12° den 6° ye alınması ve oksijen konsantrasyonunun % 21' den % 23' e çıkarılması ile NO_x emisyonları arttırılmadan partikül emisyonları iyileştirilmektedir.

Püskürtme avansının etkisi : Püskürtme avansının azaltılması NO_x emisyonlarını azaltarak, is oluşumunu artırır. Bu durum püskürtme basıncının arttırılmasını gerektirir. Dolayısıyla malzeme dayanımı ve yakıt sisteminin fiyatının artması gibi sorunlar ortaya çıkacaktır. Avansın azaltılması silindir içi maksimum basıncı düşürür, fakat yanmamış yakıt miktarı artacağından, yakıt tüketimi kötüleşmektedir. Ayrıca avansın aşırı azaltılması hafif yüklerde teklemeye sebep olmaktadır. Normal çalışma şartlarında püskürtme avansının üst ölü noktadan (ÜÖN) 10° - 15° önce olması durumunda tutuşma gecikmesi minimumdur. Tutuşma gecikmesindeki artış püskürtmenin daha erken veya daha geç yapılmasından kaynaklanır. Çünkü sıkıştırma zamanındaki havanın sıcaklığı ve basıncı ÜÖN' ya yaklaştıkça önemli miktarda değişir. Eğer püskürtme erken başlarsa, püskürtme başlangıcındaki basınç ve sıcaklık düşük olacağından tutuşma gecikmesi artar. Eğer püskürtme ÜÖN' ya çok yakın yapılırsa, püskürtme başlangıcındaki basınç ve sıcaklık yüksek olmasına rağmen, pistonun alt ölü noktaya

(AÖN) doğru hareket edip silindir hacmini genişletmesinden dolayı tutuşma gecikmesi süresi artacaktır. Bu yüzden uygun püskürtme avansı bu iki nokta arasında olmalıdır.

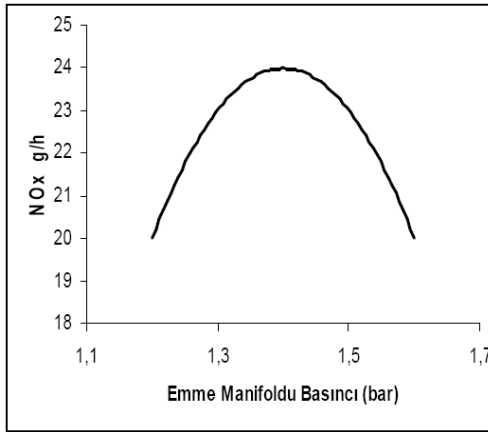
Püskürtme basıncının etkisi : Enjektörler yakıtı silindirlere yüksek basınçta atomize halde püskürten yakıt sistemi elemanlarıdır. Enjektör püskürtme basıncına bağlı olarak püskürtülen yakıt taneciklerinin çapı değişmektedir. Püskürtme basıncı arttıkça yakıtın enjektörden çıkış hızı da artar ve tanecik çapı küçülür. Çap dağılım aralığı daralır, daha üniform tanecikler oluşur. Küçük taneciklerin ataleti daha düşük olduğundan nüfuz mesafeleri daha kısadır. Bunun sonucunda tutuşma gecikmesi kısılacığından NO_x oluşumu azalacaktır.

Eşdeğerlik oranının etkisi (yakıt fazlalık katsayısı) : Şekil 2.3' de eşdeğerlik oranının azotoksit emisyonları üzerindeki etkileri görülmektedir. Dizel motorlarında silindir içinde sıfırdan sonsuza kadar değişen değerlerde hava yakıt oranları mevcuttur. Dolayısıyla önemli olan püskürtülen yakıt miktarı değil yanma öncesi buharlaşan yakıt miktarıdır (Borat ve ark. 1992). Dizel motorlarında güç ayarı motora emilen havanın içine püskürtülen yakıt miktarının değiştirilmesi ile yapılır. Motor gücü azaltılmak isteniyorsa, püskürtülen yakıt miktarı azaltılır. Böylece karışım oranı yük durumuna göre değiştirilmektedir ve motor genelde fakir karışım ile çalışmaktadır. Emisyonlar bakımından ana sorun is ve NO_x üretiminden kaynaklanmaktadır. NO_x emisyonları artan yüke bağlı olarak artış gösteren sıcaklıklar nedeniyle artmaktadır. NO oluşumu, eşdeğerlik oranı 0,9 ile 1,0 arasında iken maksimum olur (Heywood 1988). Eşdeğerlik oranı arttıkça ağır yüklerde maksimum basıncın (dolayısıyla maksimum sıcaklığın) artması karışımın daha geniş bir bölgede stokiyometrik orana yakın bir değerde yanmasını sağlar. Bu durumda NO_x oluşumu artacaktır. Eşdeğerlik oranının azaltılması ile NO_x emisyonları azalır. Fakat dizel motorlarında yakıtın düzgün püskürtülememesinden dolayı bu azalış fazla değildir.



Şekil 2.3. Eşdeğerlik oranına bağlı olarak NO_x konsantrasyonu

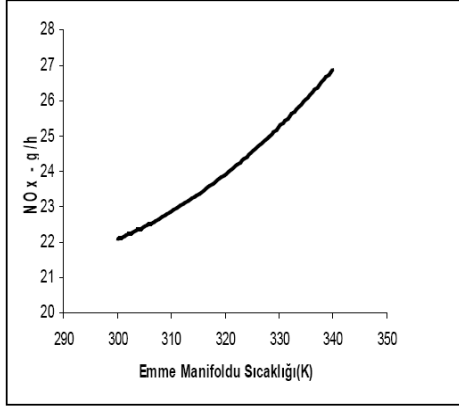
Dolgu sıcaklığının ve basıncının etkisi : Şekil 2.4' de ise dolgu basıncının azotoksit emisyonları üzerindeki etkileri görülmektedir. Düşük dolgu sıcaklığı ve basıncında NO_x ve is emisyonları da düşüktür. Dolgu basınç ve sıcaklığının artırılması tutuşma gecikmesini kısaltır. Yakıtın püskürtülmesi sırasında silindir içi sıcaklığının daha fazla olmasına dolayısıyla NO_x emisyonlarının artmasına sebep olur. Dolum havasının soğutulması NO_x emisyonlarının azaltılmasını sağlar. Dolum basıncının artırılması ile NO_x' ler önce artar, daha sonra düşer.



Şekil 2.4. Dolgu basıncının NO_x emisyonlarına etkisi

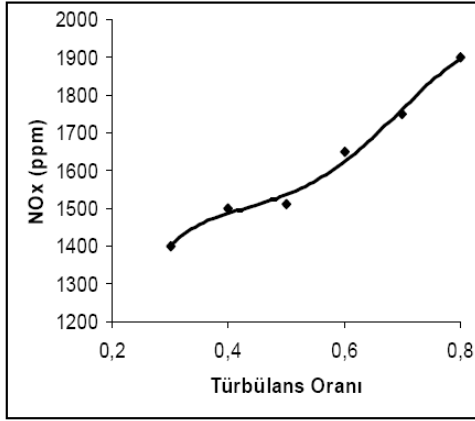
Dolgu basıncının artırılması ile NO_x oluşumunu arttıran faktörler; lokal oksijen ve azot miktarının ve yakıt spreyinin sınır tabakalarındaki dağılımının artmasıdır. Bu etki alev alanını arttırarak birim zamanda yanan kütle miktarını arttırır. Dolayısıyla NO_x

oluşumu artar. Diğer yandan Şekil 2.5’ de olduğu gibi dolmuş basıncının artırılarak sıcaklığının azaltılması ve yoğunluğu fazla olan hava içinde yakıt spreyinin dağılmasının azaltılması, yakıt spreyinin karşısındaki lokal hava yakıt oranlarını azaltacağından NO_x oluşumu azaltılmış olur (Herzog ve ark 1992).



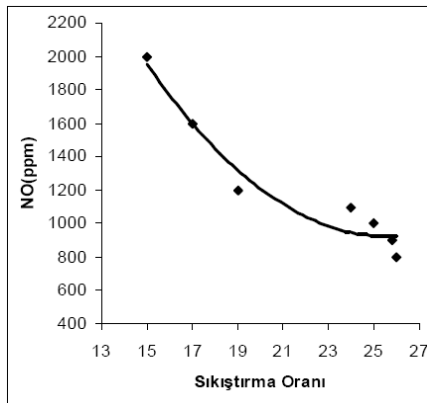
Şekil 2.5. Dolmuş sıcaklığının NO_x emisyonlarına etkisi

Türbülans etkisi : Şekil 2.6’ da türbülans etkisinin azotoksit emisyonları üzerindeki etkileri görülmektedir. Türbülans oranının değiştirilmesi yakıtın buharlaşmasına ve hava yakıt karışım işlemine etki eder. Ayrıca sıkıştırma süresince silindir cidarı ısı transferine ve püskürtme sırasındaki sıcaklığa etki eder. Normal çalışma sırasında türbülans oranındaki değişimin tutuşma gecikmesi üzerindeki etkisi küçüktür. Türbülans ile motorun ilk çalışması sırasında yüksek buharlaşma ve karışım elde edildiğinden bu etki daha önemlidir. Türbülans oranının azaltılması ile yakıt ve havanın karışması için gerekli zaman arttırılmış olur. Böylece yakıt damlacıklarının etrafındaki oksijen konsantrasyonu azalır. Sonuçta yanma sıcaklığı aşırı yükselmez. Ancak ısı verim kötüleşir. Dolmuş hareketinin azaltılması püskürtülen yakıtın hava ile karışmasını azaltır. Yanan karışım bölgesindeki yanmamış karışım miktarını arttırır. Sonuçta NO_x emisyonları azalacaktır. Fakat is emisyonları artacaktır. is emisyonlarının azaltılabilmesi için püskürtme basıncı arttırılmalıdır (Thien ve ark 1965).



Şekil 2.6. Türbülans oranının NO_x emisyonlarına etkisi

Sıkıştırma oranının etkisi : Şekil 2.7' de sıkıştırma oranının azotoksit emisyonları üzerindeki etkileri görülmektedir. Değişken tutuşma gecikmesini kontrol eder. Direkt püskürtmeli dizel motorlarında NO oluşumuna etki eden önemli faktörlerden biridir. Püskürtme avansının sabit kalması şartıyla, sıkıştırma oranının azaltılması tutuşma gecikmesini uzatacaktır. Dolayısıyla bu süre boyunca püskürtülen yakıt miktarı artacağından silindir içi maksimum sıcaklık yükselecek ve buna bağlı olarak NO oluşumu artacaktır. Sıkıştırma oranının artırılması ile tutuşma gecikmesi kısılacağından NO oluşumu azalacaktır. Fakat sürtünme işi artacağından çevrim verimi kötüleşecektir (Middlemiss 1978).



Şekil 2.7. Sıkıştırma oranının NO_x emisyonlarına etkisi

2.1.5 Egzoz yardımcı sistemlerinin NO_x emisyonlarına etkisi

2.1.5.1 SCR (üre enjeksiyonlu sistem)

Partikül filtresinin regenerasyonunda hem PM miktarında hem de NO_x miktarında azalma sağlanması için NO_x ile ürenin reaksiyona sokulması esasına dayanan bir sistemdir.

Bu sistemde Şekil 2.8' de görülen ek tank, ilave üre hattı ve enjektörü gibi ilave düzeneklere ihtiyaç duyulmaktadır. Seçici katalitik indirgeme'nin en önemli avantajı, katalizörlerin yakıttaki kükürt veya yağlayıcılarla kirlenmemesidir.

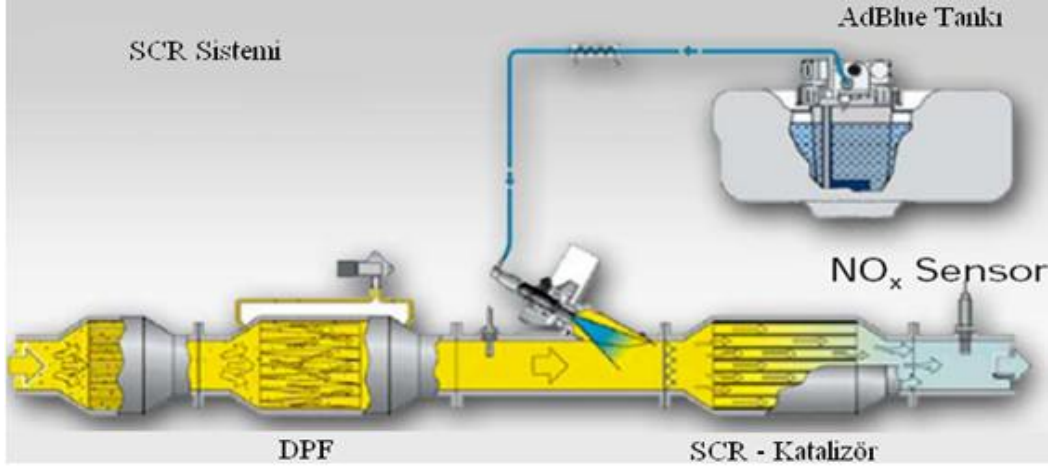
İki tip SCR vardır:

HC-SCR : NO_x indirgeyicisi HC' dir.

Üre-SCR : İndirgeyici etmen ürenin ürettiği amonyaktır.

SCR sistemi egzoz emisyonlarında % 90 HC, CO ve partikül indirgenmesi sağlarken aynı zamanda % 80-90 arası NO_x indirgemelerini de sağlamaktadır. AdBlue (egzoz gazlarını düzenlemek için geliştirilmiş % 32,5 su ile karışım halinde bulunan üreden oluşan yakıt) olarak isimlendirilen biyolojik olarak bozunabilir özellikteki kimyasal solüsyon, DeNO_x katalizör girişine enjekte edilerek NO_x emisyonlarında önemli oranda azalma sağlamaktadır.

AdBlue karışımı -11 °C sıcaklıkta donduğu için soğuk hava koşullarında otomatik ısıtıcı tarafından ısıtılmak zorundadır.



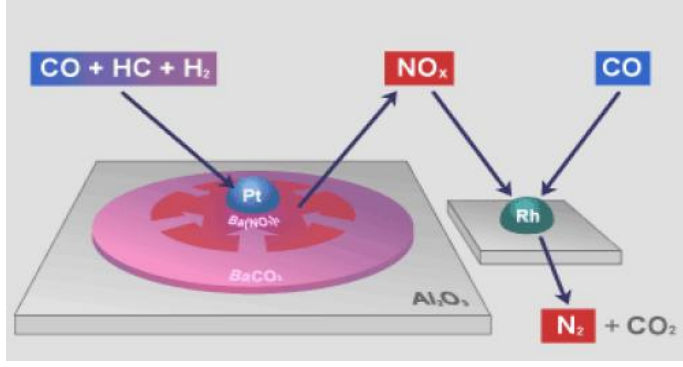
Şekil 2.8. SCR sistem komponentleri (BMW 2007)

2.1.5.2 NAC (NO_x emici katalistleri)

Günümüzdeki en yeni emisyon kontrol stratejilerinden birisidir. 90' lı yıllardan itibaren kullanılmaya başlanmıştır. Temel metal oksitleri ve zengin metal kaplamalarını kullanarak NO_x kontrolüne etki ederler. Sisteme giren NO_x gazı temel metal elemanlar ve oksitler ile tepkimeye girerek nitrojen gazı olarak atılır.

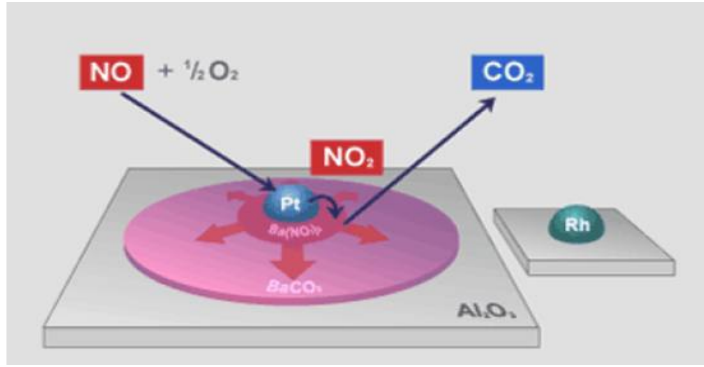
İlk üretilen azot emici katalistlerinde rodyum elementi kullanılmaktadır. Ancak bu sistem zengin ya da stokiyometrik hava/yakıt karışımlarında sonuç vermektedir.

Şekil 2.9 ve 2.10' da zengin ve fakir karışım durumları görülmektedir. Bu şartlar altında birbirini izleyen iki reaksiyon gerçekleşir. İlk olarak katalistten NO_x salınımı olur daha sonra ikinci faz olarak nitrojene indirgenerek sistemden atılır. Kullanılan yakıt içinde kükürt olması sistemin verimliliğini düşürmektedir.



Şekil 2.9. Zengin karışım durumu (Fang 2007)

Dizel motorlarında kullanılan sistem zengin karışım durumunda kullanılan ile benzerdir. Fakir karışım durumunda kullanılan LNT (Lean NO_x Trap) sisteminden atmosfere CO₂ salınımı olur.

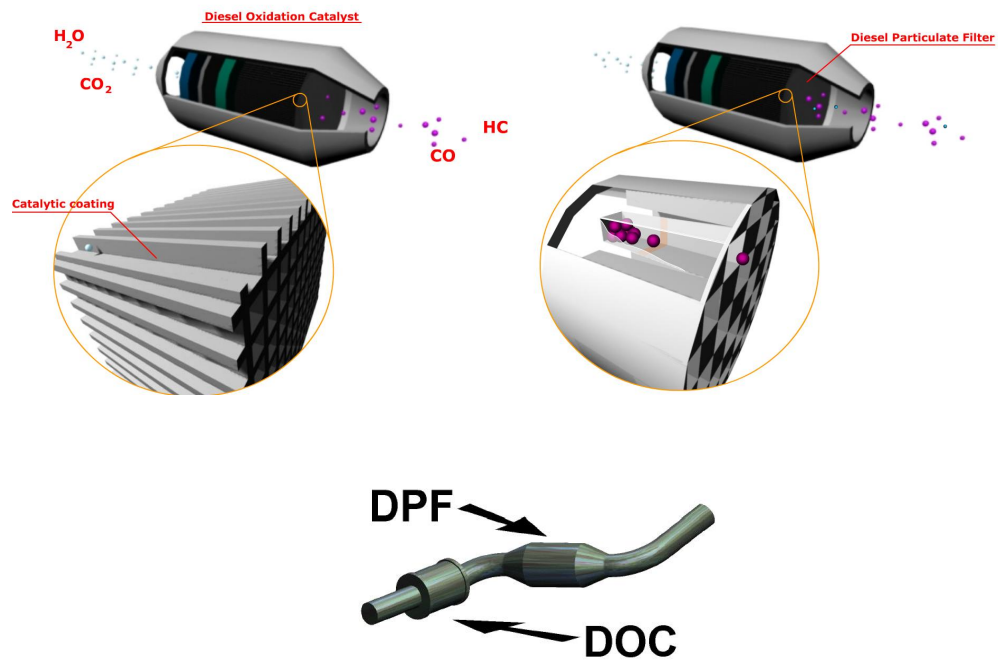


Şekil 2.10. Fakir karışım durumu (Fang 2007)

2.1.5.3 DOC (dizel oksidasyon katalistleri)

İki yollu katalizör olarak da bilinen dizel oksidasyon katalisti CO, HC ve PM gibi egzozdan kaynaklanan kirleticilerin kontrolünde kullanılan en eski yöntemlerden biridir. Dizel oksidasyon katalistleri kirletici maddeleri zararsız gazlara oksidasyon yoluyla çevirir. Karbonmonoksit ve hidrokarbonları karbondioksit ve suya dönüştürür ve dizel partikül emisyonlarının kütlesini azaltır fakat azot oksitler üzerindeki etkisi HC ve CO emisyonlarına oranla daha azdır. Bir oksidasyon katalisti dizel partikülünün çözülebilir organik bölümünün (SOF) % 90 kadarını azaltır (California Air Resource Board Staff Report, 2002). SOF' nin azaltılması önemlidir, çünkü partikülün bu kısmı sağlıkla ilgili

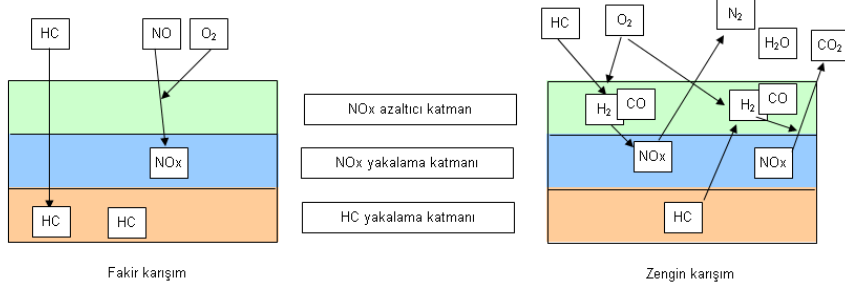
pek çok kimyasalı içermektedir. Dizel oksidasyon katalistleri toplam partikülü oluşturan bileşenlere bağlı olarak partikül emisyonlarının % 20-50 , CO ve HC emisyonlarını ise % 70' den fazla düşürebilir (Fang 2007). Gerçek emisyon miktarındaki azalma motor tipine, yaşına, ebatlarına, çalışma şartlarına, ölçüm yöntemine ve yakıttaki kükürt miktarına göre değişim göstermektedir. Oksidasyon katalistleri CO ve HC emisyonlarındaki azalma sağlamasına ek olarak dizel dumanını düşürmekte ve dizel egzozunun keskin kokusunu da ortadan kaldırmaktadır (AECC Responce 2009). Şekil 2.11' de dizel oksidasyon katalistinin şematik şekli görülmektedir.



Şekil 2.11. Dizel oksidasyon katalistinin şematik yapısı

Dizel motorlarında kullanılan en yeni teknoloji olan DPF, DOC ve NO_x tutucunun aynı katalist içinde yer almasıyla HC ve NO_x emisyonlarının tek konvertör içerisinde yakalanabilmesi sağlamıştır. Şekil 3.12' de gösterildiği üzere konvertörün iç kısmı üç katmandan oluşmaktadır. En üstte NO_x azaltıcı katman, orta kısımda NO_x yakalama katmanı ve en alt kısımda HC yakalama katmanı yer almaktadır. HC yakalama katmanında HC oksitlendirilerek H₂ ve CO emisyonları oluşturulur. Bu katmanın ürünleri NO_x yakalama katmanında N₂, CO₂ ve H₂O gazlarına dönüştürülürler. NO gazı

NO_x' e okside edilir ve NO_x yakalama katmanı tarafından emilir. Bu sayede egzoz çıkışındaki HC ve NO_x emisyonlarında önemli düşüş sağlanır (Nissan 2007).



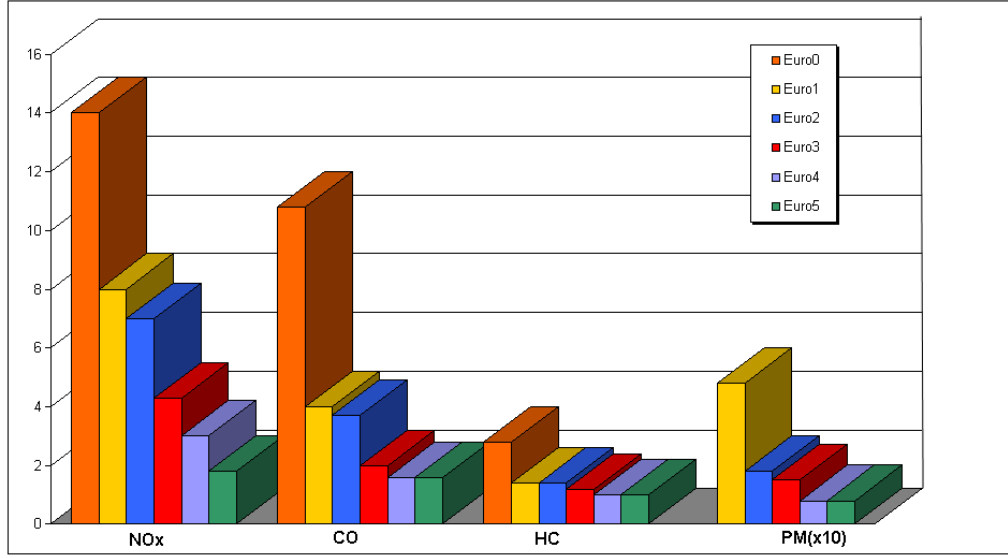
Şekil 2.12. HC- NO_x yakalama katalizörünün yapısı ve çalışması

2.2 Egzoz Gazları Denetimi ve Standartları

Dünyada ilk düzenlemeler 1968 yılında California' da yapılmış olup Avrupa' daki ilk uygulamalar ise 1972 yılında ECE R.15.00 ve EEC.70/220 standartları ile başlamıştır. Günümüzde ise tüm gelişmiş ve gelişme yolundaki dünya ülkeleri, çeşitli standartlarla (EEC/ECE, EPA, JIS) egzoz emisyonlarına denetimler uygulamaktadır.

Avrupa' da uygulanan standartlara bakılacak olursa temel uygulamaların, ECE R.15.04 ile başladığı, sonrasında Euro 1, Euro 2, Euro 3, Euro 4 ve 1 Ekim 2009' da yürürlüğe giren , Ekim 2014' e kadar geçerli olacak Euro 5 standardı olduğu görülmektedir. Euro emisyon standartları Avrupa Birliği bünyesinde geçerli olup, egzozdan çıkan zararlı gaz ve partikülleri, kademeli olarak ve belirli bir takvim içerisinde azaltma programıdır. Yıllar içerisinde gelişim gösteren bu standartlarda, araçların tüm kullanım şartlarını kapsayacak testler öngörülerek emisyon seviyelerinin daha aşağılara çekilmesi hedeflenmiştir. Aşağıda Çizelge 2.2' de aşağıya çekilen emisyon değerleri karşılaştırmalı olarak görülmektedir.

Çizelge 2.2. Emisyonların Euro standartlarına göre değişimi



Euro 2 (1998) : Euro 2' de ölçüm çevrimi açısından bir değişiklik getirilmeyip sadece limit değerlerin değiştirildiği görülmektedir.

Euro 3 (2000) : Euro 3' de, 40 sn' lik ilk ısınma süresi iptal edilmiş, tip onay testleri için -7 °C' de emisyon ölçümünün yapılması zorunluluk haline getirilmiş ve OBD (Onboard Diagnosis) uygulamaları başlamıştır.

Euro 4 (2005) : Euro 4' te limit değerler değiştirilmiş ve 80 000 km olan limit değerlerin sağlanma süresi 100 000 km' ye çıkarılmıştır.

Euro 5 (2009) : Euro 5, öngörülen limit değerlerin sağlanabilmesi için dizel araçlarda Partikül Filtresi (DPF) kullanımının zorunlu hale gelmiştir. Ayrıca Euro 4' le beraber 100 000 km' ye çıkarılmış olan limit değerlerin sağlanma süresinin 120 000 km' ye çıkarılmıştır.

Avrupa Birliği Komisyonu 2009 yılından geçerli olmak üzere motorlu taşıtlardan kaynaklanan egzoz emisyonları için yeni bir düzenleme oluşturmuş ve motorlu taşıtlardan yayılan zararlı gazların izin verilen sınır değerlerini bir miktar daha daraltmıştır. Buna göre yayınlanan 2005 yılında yürürlüğe giren Euro 4 sınır değerleri

ise Çizelge 2.3’ de ve Avrupa’ da 2009 yılından itibaren geçerli olan Euro 5 sınır değerleri Çizelge 2.4’ de gösterilmiştir.

Çizelge 2.3. LCV araçlar için Euro 4 Avrupa emisyon standartı limit değerleri (g/km)

Sınıf	Emisyon	Yıl	CO	HC	HC+NO _x	NO _x	PM
Dizel Araçlar							
N1 <1305 kg	Faz 4	2005.01	0.50	-	0.30	0.25	0.025
N2 1305-1760 kg	Faz 4	2005.01	0.63	-	0.39	0.33	0.04
Benzinli Araçlar							
N1 <1305 kg	Faz 4	2005.01	1.0	0.1	-	0.08	-
N2 1305-1760 kg	Faz 4	2005.01	1.81	0.13	-	0.10	-

Çizelge 2.4. LCV araçlar için Euro 5 Avrupa emisyon standartı limit değerleri (g/km)

Sınıf	Emisyon	Yıl	CO	HC	HC+NO _x	NO _x	PM
Dizel Araçlar							
N1 <1305 kg	Faz 5	2009.1	0.50	-	0.23	0.18	0.005
N2 1305-1760 kg	Faz 5	2009.1	0.63	-	0.295	0.235	0.005
Benzinli Araçlar							
N1 <1305 kg	Faz 5	2009.1	1.0	0.075	-	0.06	0.005
N2 1305-1760 kg	Faz 5	2009.1	1.81	0.13	-	0.075	0.005

Euro 4 ve Euro 5 emisyon limitleri karşılaştırıldığında HC, NO_x ve özellikle PM emisyonlarına getirilen ilave sınırlamalar nedeniyle yeni motor kalibrasyon metodolojilerinin ortaya konmasının gerekli olduğu görülmektedir.

Euro standartlarındaki gelişmeler ile yakıt içindeki kükürt miktarının yasal sınırları da giderek aşağıya çekilmeye başlanmıştır. Çizelge 2.5’ de dünyadaki kükürt oranının yıllara göre yasal sınırları ppm cinsinden gösterilmiştir.

Çizelge 2.5. Yıllara göre çeşitli ülkelerdeki yasal kükürt miktarları (ppm)

Country	Year					
	2005	2006	2007	2008	2009	2010
European Union	50				10	
USA	500	15				
China	350 for Beijing					
Brazil	500			50		
India (11 Major Cities)	350				50	
India	500					
Japan	50		10			
Korea	50	30				

Emisyon sınırları; araç sayısı ve çevresel etkilerinin artması, gelişen teknoloji, küresel ısınmada araçların rolü gibi etkenlerle ve atmosfere CO₂ emisyonlarının azaltılması (KYOTO) gibi hedeflerle, her dört beş yılda bir gittikçe düşürülerek sıkılaştırılmaktadır. Bazı yerel yönetimler (California, Londra, Milano vb.) “Low Emission Zone” amaçlı veya aşırı kirlilik nedeniyle daha da düşük limitler talep edebilmektedir. Emisyon sınırlarına uyum için motorlar sürekli geliştirilmekte, günümüzde motorlarda son derece kompleks ve pahalı teknolojiler kullanılmaktadır. Gelecekteki “Sıfır Emisyon” hedefi için, elektrik veya hidrojen gibi alternatif enerjiler kullanan “Hibrid” motorların geliştirme süreci başlamıştır.

Euro 4’ e kadar HC, CO, NO_x ve PM emisyonları Çizelge 2.6’ da gösterilen benzer çözümlerle azaltılabilmektedir. Euro 4 ve sonrası NO_x ve PM sınırları çok daraltılmıştır. Mevcut çözümler NO_x ve PM emisyonlarını ters yönde etkilediğinden ilave sistemlere ihtiyaç duyulmuştur. Euro 4 sonrası azalan PM ve NO_x sınırları EGR+DPF, DOC, NAC veya SCR teknolojilerini gerektirmektedir. Dünya ülkelerinin teknoloji seçimindeki tercihleri Şekil 2.13’ de gösterilmiştir.

HDD (on road)										
	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
Europe			SCR EGR + DPF EGR + DOC			SCR EGR + DPF EGR + DOC			SCR + DPF	
USA		EGR		EGR + DPF				SCR + DPF NAC + DPF		
Japan		EGR		SCR + DPF SCR				SCR + DPF NAC + DPF		

Şekil 2.13. Yıllara göre emisyon azaltma teknolojilerindeki seçimler

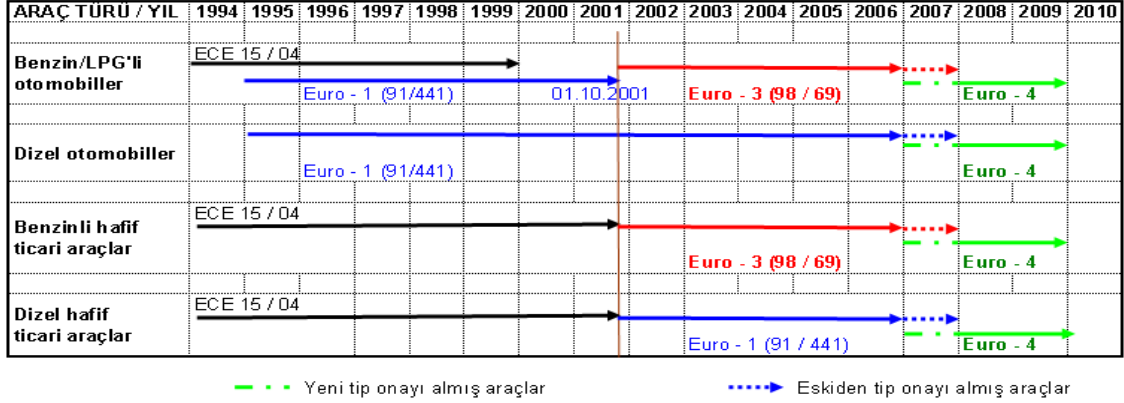
Çizelge 2.6. Değişen Euro normlarını sağlamak için kullanılan farklı teknolojiler

EMİSYON	DİZEL MOTOR SİSTEMİ	EURO 1-2	EURO 3	EURO 4	EURO 5
CO,HC,NO_x,PM	HAVA EMİŞ TURBOŞARJ(+WASETGATE) INTERCOOLER	TURBOŞARJ INTERCOOLER	TURBO(+W) INTERCOOLER	TURBO(+W) INTERCOOLER	TURBO(+W) INTERCOOLER
	MOTOR KONTROL SİSTEMİ YAKIT SİSTEMİ BASINCI (bar) ENJEKSİYON SİSTEMİ/ENJEKTÖR DEĞİŞKEN ENJ.AÇMA BASINCI(VP)	MEKANİK 250-1200 KLASİK	ELEKTRONİK 1500-1800 COM.RAIL/UNIT VP	ELEKTRONİK 1800-2000 COM.RAIL/EUI VP	ELEKTRONİK >2000 COM.RAIL/EUI VP
HC,NO_x	DİREKT ENJEKSİYON PİSTON/YANMA ODASI TASARIMI SUPAP SAYISI/SİLİNDİR	DI 2	DI OPTIMIZE 4	DI OPTIMIZE 4	DI OPTIMIZE 4
NO_x,PM	YANMA KONTROLÜ EGR+PARTİKÜL FİLTRESİ	X	X	EGR+DPF	EGR+DPF
NO_x	AFTERTREATMENT SCR	X	X	SCR	SCR

Egzoz emisyonlarının Türkiye' deki geçmişi

Türkiye' de uygulanan emisyon standartları incelendiğinde, Türkiye' nin emisyon değerleri açısından Avrupa standartlarını benimsemiş olduğunu, ancak uygulamaların biraz geriden takip edildiği görülmektedir. Euro emisyon standardına uyum süreci ülkemizde 2001 yılında Euro 1 standardıyla başlamıştır. Uygulama Avrupa Birliği ülkelerinde Euro 1, Euro 2, Euro 3, Euro 4 sıralamasıyla yapılırken, ülkemizde yatırım maliyetlerinin yüksekliği nedeniyle direkt Euro 1' den ve Euro 4' e geçilmiştir.

Ülkemizde 1 Ocak 2009' dan itibaren Euro 4 normları geçerli olup, 2012 yılında Euro 5 normuna geçiş yapılması planlanmaktadır. Emisyon sınırlamalarının Türkiye'deki seyri Şekil 2.14' de verilmiştir.



Şekil 2.14. Emisyon sınırlamasının Türkiye' deki geçmişi

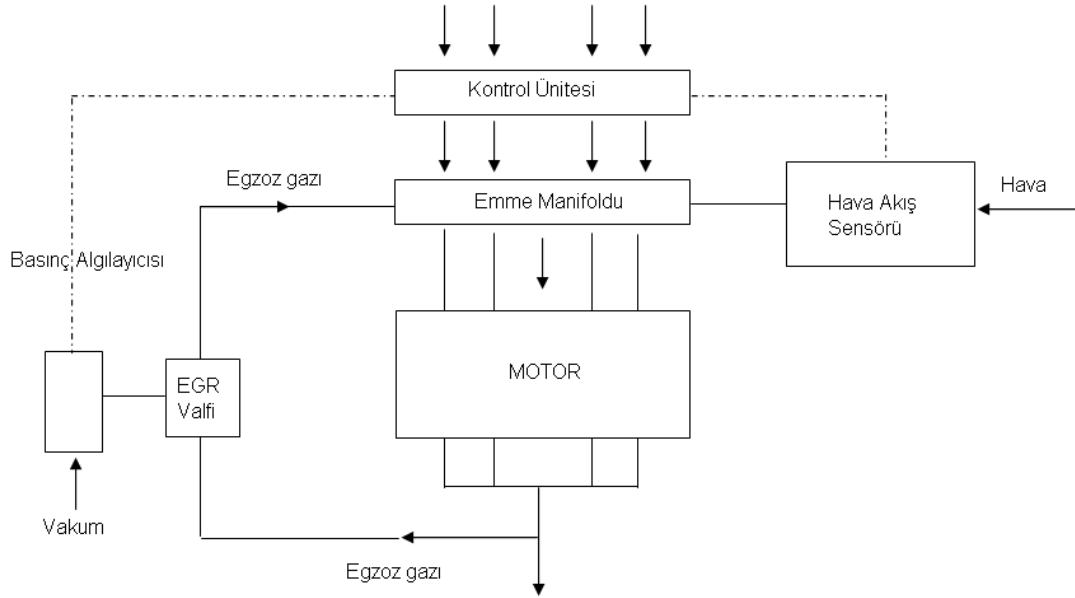
Emisyon laboratuvarlarında emisyon direktiflerinin gerektirdiği şekilde dört farklı zararlı egzoz ürününün ölçümü yapılırken, trafikte seyretmekte olan araçlar için ilgili istasyonlarda yapılan emisyon ölçümleri sadece CO ölçümüne dayanmaktadır. Yeni araçların uzun vade dayanım için araç ömrünün başlangıcında sahip olmaları gereken emisyon değerleri de emisyon direktiflerinin aradığı sınır değerlerden çok daha düşük olduğundan bu değerleri ölçebilecek sistemlerin çok daha hassas ölçüm yeterliliğine sahip olması ve ölçüm güvenilirliği açısından daha üstün bir tekrar edilebilirlik performansı sergilemeleri gerekmektedir.

2.3 EGR Çalışma Prensipleri

Şekil 2.15' de görüldüğü üzere EGR, egzoz gazının bir kısmını yeniden motor içine, silindirlere göndererek yanma sonucunda oluşan ısıyı düşürmeyi, bu şekilde çevre açısından zararlı azot oksit gazlarını kontrol altında tutmayı hedefleyen bir sistemdir. Günümüz benzinli ve dizel motorlarında yaygın bir şekilde kullanılmaktadır.

Motora giren taze havanın yanmış egzoz gazı ile karışımı, yanma sıcaklığını ve (dizel motorlarda) fazla oksijen miktarını azaltır. NO_x gazlarının oluşumu yüksek

sıcaklıklarda çok hızlandığından, sıcaklığın kontrol edilmesi zararlı NO_x gazları oluşumunun da kontrol edilmesini sağlar.



Şekil 2.15. EGR çalışma prensibi

NO_x yanma prosesinin sonundaki yüksek yanma sıcaklığı nedeniyle oluşur, motordan atılan egzoz gazının bir miktarı soğutulmuş olarak yanma odasına geri gönderilir, silindirde oksijen miktarı azalır, yanma sıcaklığı düşer ve NO_x oluşumu engellenir. EGR tek başına PM emisyonlarının azaltılmasına yetmez, ayrıca DPF partikül tutucu filtre kullanılmalıdır. Soğutma için motordan (~ % 30) daha fazla ısı alınır, bu nedenle soğutma sistemi kapasitesi artırılmalıdır. Güç düşüklüğüne ve (~ % 5 -7) yakıt sarfiyatı artışına yol açar. Değişken geometrili turboşarj (DGT) gibi kompleks elemanlar ve ilave sistemler nedeniyle motor yerleşimi daha zordur. Şekil 2.16' da EGR sistemi çalışma mekanizması, Şekil 2.17' de ise EGR sistemi komponentleri görülmektedir.

Uzun zamandır hafif hizmet tipi dizelerde başarı ile kullanılmasına karşılık, orta ve ağır hizmet tipi dizelerde motorun aşınmasını arttırdığından bazı sorunlar ortaya çıkmaktadır. EGR ile yanma odasının farklı bölgelerindeki lokal sıcaklıklar değiştirilmiş olur. Bu da yakıtın buharlaşma hızına ve O_2 oksidasyon hızına etki eder. O_2 oksidasyon hızı lokal sıcaklığın artması ile kısmen artar. EGR' nin neden olduğu alev sıcaklığındaki azalma oksidasyon hızının azalmasına ve O_2 oluşumunun artmasına yol açar.

EGR oranı arttıkça NO_x azalır, fakat hava fazlalık katsayısının azalmasından dolayı is ve yakıt tüketimi kötüleşmektedir. Dolum havası içindeki oksijen miktarı azaldıkça CO emisyonları artacaktır. Aşırı EGR hava yakıt oranını bozacağı için PM ve is emisyonları artar. Silindirlere geri gönderilen egzoz gazları soğutularak ya da püskürtme basıncı arttırılarak PM ve is oluşumu azaltılabilmektedir.

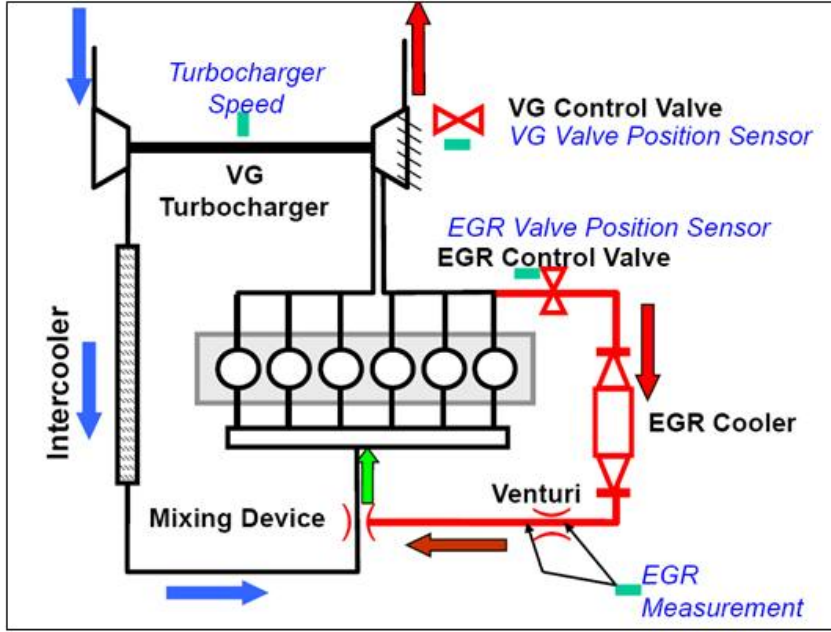
İçten yanmalı motorlarda atmosferi kirleten temel üç kirletici CO, HC, NO_x ' lerdir. Bu kirletici oranları H/Y oranıyla doğrudan orantılıdır. Bunun için H/Y oranı değiştirilerek CO ve HC oranları kontrol altına alınabilmektedir. Fakat yanma sonu sıcaklığının artması sonucu NO_x oranında artış diğer kirleticilerle ters orantılı olduğundan büyük sorunlar ortaya çıkmıştır. Motorlarda NO_x emisyonlarını kontrol edebilmek için iki yol vardır. Birinci yol katalitik konvertör kullanılarak egzoz gazını kimyasal işleme tabi tutmak, diğer yol ise yanma esnasında nitrojen oksit oluşumunu azaltmaktır.

Bir kısım egzoz gazları yanma odası içerisinde tutularak NO_x ' in kontrolü için kullanılır. Bu egzoz gaz resirkülasyonu ile sağlanır. H/Y oranı 15/1 oranına getirildiği zaman nitrojenin oksitlenmesi daha da artmaktadır ve NO_x oranında büyük bir artış görülmektedir. H/Y oranını 18/1 veya 20/1 seviyelerinde tutulduğu zaman yanma sonu sıcaklığı düştüğü için NO_x miktarında da düşme meydana gelmektedir. Öte yandan karışım oranının fakirleşmesinden dolayı motor performansında büyük bir düşme meydana gelmektedir. Silindir içine giren havanın içeriğindeki gazlar, kütleli olarak % 75,5 nitrojen ve % 23 oksijenden oluşmaktadır (Heisler 1995). Bu iki element normal koşullarda tehlike arz etmez iken yüksek sıcaklıklarda birleşerek NO_x gazını oluşturmaktadır. Bu iki elementin silindir içinde birleşmesi 1370 °C' de olmaktadır. Yanma odası içerisindeki egzoz gazları ile seyreltilmesi sonucu yanma sonu sıcaklıkları, dolayısıyla üretilen NO_x miktarı düşmektedir. Karışım içine bir miktar egzoz gazı verilip, yanmayı biraz olsun kötüleştirerek yanma sonu sıcaklığını düşürmek suretiyle NO_x miktarı düşürülmektedir.

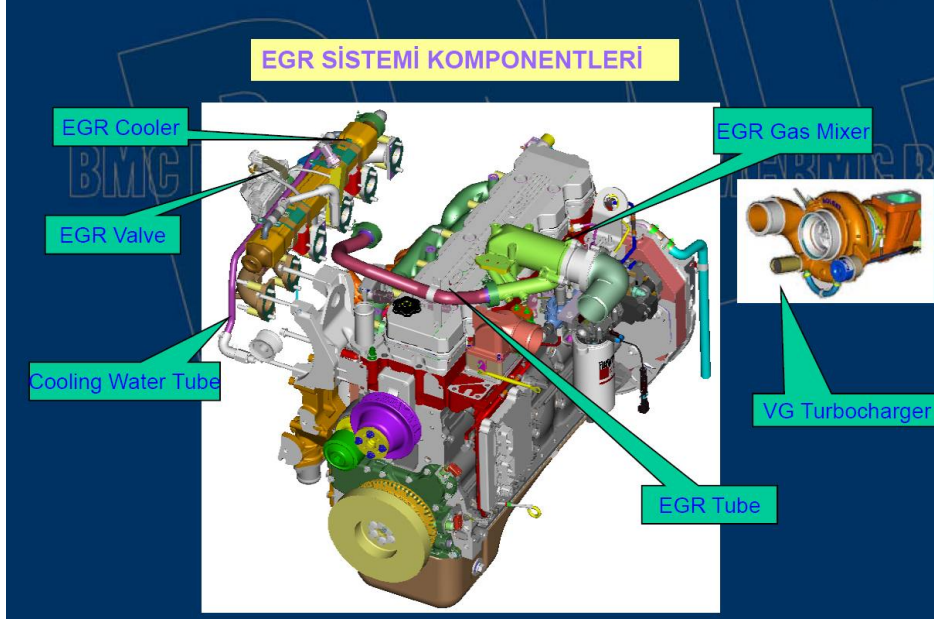
Motor dizaynına bağlı olarak emme manifolduna giren egzoz gaz miktarı % 6 ile % 13 arasında değişir. Benzinli motorlarda, egzoz gazı geri dolaşımı yanma odasına emilen toplam dolgunun % 10' u düzeyinde olduğunda NO_x emisyonu % 50- 60 oranında

azalmaktadır. Zengin H/Y karışımını seyreltmek amacıyla N_2 , su buharı ve CO_2 gazı silindir içerisine emdirilerek yanma sonunda egzoz gazlarının emisyonları azaltılmaktadır. Benzin motorunda bu yöntemin, yakıtın daha hızlı buharlaşarak karışımın oluşmasını hızlandırma ve tutuşmaya hazırlama gibi bir faydası da vardır. Bu şekilde, özellikle düşük yüklerde HC ve CO emisyonlarında da iyileşme elde edilmektedir.

Egzoz gazlarındaki NO_x miktarı, emme anındaki nitrojene, oksijenin miktarına, yanma sonu sıcaklığına ve bu sıcaklıkta kalma sürecine bağlıdır .



Şekil 2.16. EGR sistemi çalışma mekanizması



Şekil 2.17. EGR sistemi komponentleri

2.3.1 EGR tipleri

Egzoz geri dönüşüm sistemleri temel olarak EGR sıcaklığına, basıncına ve yapısına göre üç farklı kategoride sınıflandırılırlar.

Sıcaklığa göre ;

Sıcak EGR: Internal EGR olarak da bilinen bu yöntemde egzoz gazları soğutma işlemine tabi tutulmadan motora gönderilir sonuç olarak hava dolgu sıcaklığında yükselme gözlenir. Yakıt ekonomisinde kötüleşmeye neden olur.

Tam soğutmalı EGR: Egzoz gazları geri dönüştürülmeden önce su soğutmalı bir sistemle tamamen soğutulur. Ancak bu yöntemde egzoz gazındaki nem yoğunlaşarak silindirlere istenmeyen etkilere yolaçabilir.

Kısmi soğutmalı EGR: Tam soğutmalı sistemde yaşanan yoğunlaşma sorunundan kaçınmak için egzoz gazları çiy noktasına kadar soğutulur.

Basınca göre;

Düşük basınçlı EGR: EGR geçişi türbin düşük basıncından kompresörün yüksek basıncına doğrudur. Bu sistem kompresör çıkışı yüksek sıcaklığa ve intercoolerda performans düşüklüğüne yol açabilmektedir.

Yüksek basınçlı EGR: EGR geçişi kompresörün yüksek basıncından türbin düşük basıncına doğrudur. Aşırı hava oranı düşüşüne ve yakıt tüketiminde kayda değer artışa neden olmaktadır (Kohketsu 1997). Bu sistemlerde kompresör ve ara soğutucu, egzoz gazlarından kaynaklanan olumsuzluklarla karşı karşıya gelmezler.

Yapısına göre;

Uzun tur sistem (LR): LR sisteminde egzoz gazını resirküle etmek için emme havası filtresindeki basınç düşüşü kullanılmaktadır. EGR oran kontrolü için EGR hattına bir valf yerleştirilir.

Kısa tur sistem (SH): SR sisteminde, kompresör difüzöründeki yüksek hız ve alçak basınç avantajı kullanılır. Bu sayede egzoz manifoldundan kompresöre bir EGR akışı sağlanır. Bu sistemde ihtiyaç duyulan iç soğutucu ile hem taze dolgu havası hem de egzoz gazları soğutulup kontrol altına alınmıştır. EGR oran kontrolü için EGR hattına bir valf yerleştirilir (Lundquist 2000).

2.3.2 Farklı motor çalışma durumları için EGR' nin çalışması

Rölanti devrinde EGR' nin çalışması: Motor rölantide çalıştığı durumlarda gaz kelebeği kapalı konumda olduğu için atmosfer basıncı ve diyafram yayı EGR kesme valfini kapatarak egzoz gazlarının emme manifolduna geçmesine izin vermez.

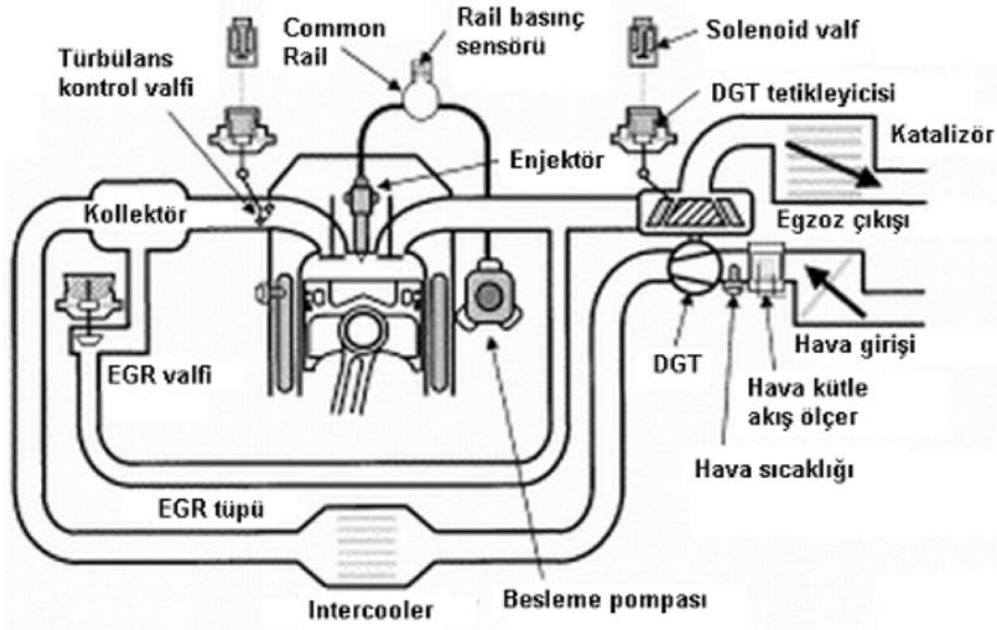
Düşük ve orta devirlerde EGR' nin çalışması: Motor ara hızlarda çalışırken gaz kelebeği yavaş yavaş açıldığında emme manifoldundaki kısmen yüksek vakum EGR kesme valfine etki ederek diyafram yayının kuvvetini yener ve kanalın yavaşça

açılmasını sağlar. Egzoz gazları emme manifolduna girerek yakıt karışımına eklenir. Bu durumda emme manifolduna egzoz gazı akışı çok az olmaktadır .Fakat gaz kelebeği açılıp motor devri arttığı anda emme manifoldundaki vakum miktarı artacağından EGR kesme valfi daha çok açılır ve egzoz gaz geçişi daha da artar. Bu anda maksimum egzoz gaz akışı vardır.

Tam yükte EGR' nin çalışması: Motor tam yükte çalışırken motordan istenen güç çok fazla olacağı için motorun çalışmasını olumsuz yönde etkileyen EGR sisteminin çalışmaması istenir. Motor tam açık gaz kelebeği konumunda çalışırken EGR sisteminde bulunan bir sınırlayıcı emme manifoldundaki havanın hızının artmasıyla vakum o kadar düşer ki sınırlayıcı vakumun EGR kesme valfine ulaşmasına izin verilmez. Motor tam yük ve hızlarda çalışırken EGR sistemi devre dışı kalır.

2.3.3 EGR ve turboşarj ilişkisi

Günümüz dizel motorlu araçları geçmiş yıllara göre daha yüksek yakıt verimi gerçekleştirirken, egzoz emisyonlarında da azalma göstermektedir. Bu teknoloji, turboşarj, değişken geometrili turboşarj, egzoz gaz resirkülasyonu, elektronik kontrollü yakıt enjeksiyon sistemleri, her silindire çoklu supap, hava akış olayları, oksidasyon ve NO_x katalizörleri, partikül filtresi gibi, yardımcı ekipmanlardaki gelişmeler ile mümkün olmaktadır. Bu sistemlerin araç üzerindeki genel dizaynı Şekil 3.18' de gösterilmektedir. Bu sistemler tam olarak elektronik kontrol ünitesindeki (ECU) yazılım ile kontrol edilmektedir. Ayrıca bu teknolojik gelişmeler, sistemi daha kompleks hale getirmiş, ve bunun sonucu olarak motorun maliyetinde ve kontrol sistemlerinde önemli bir artış olmuştur (Wijetunge ve ark. 1999).



Şekil 2.18. Yardımcı ekipmanlı dizel motor dizaynı

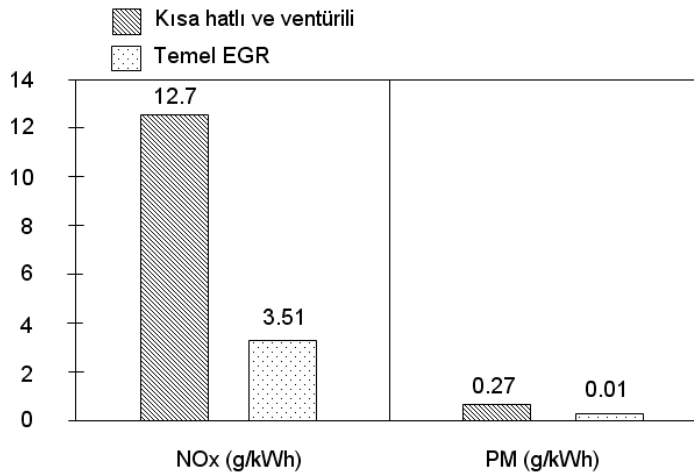
Turboşarj ile, doğal emişli bir motora göre çok daha fazla hava silindir içerisine alınabilmektedir. Yanma odasına daha fazla havanın alınması sonucu yakıtın tamamen yanması mümkün hale gelmekte, böylece PM emisyonları azalmaktadır. Aslında turboşarjın temel prensibi çok basittir. Uygulamada ise turboşarj çok kompleks bir makinadır. Sadece turboşarjın parçalarının tam olarak koordine edilmesi yetmez, aynı zamanda motor ile turboşarjın uyum içerisinde çalışabilmesi için iyi bir tasarım gereklidir. Düşük güç yoğunluğunu karşılamak için dizel motorları turboşarj ile donatılmaktadır. Turboşarjın hava giriş kısmı, kompresöre bir basınç sensörü veya motor yönetim sistemine bir vakum sensörü takmak suretiyle ahenkli bir şekilde değiştirilebilmektedir.

Son yıllarda, motorun tüm hız-yük şartlarında ve geçici rejimde herhangi bir kayıp olmaksızın iyi bir performans elde etmek için DGT kullanılmaya başlanmıştır. DGT sisteminde, giren egzoz gazını sınırlandırmak için türbin tekerleği üzerinde bulunan kanatçıkların yönü bir tetikleyici ile ayarlanmaktadır. Bu değişken akış oranları, istenen basınç ve sıcaklık şartlarının oluşmasına izin verir. Düşük motor hızlarında yani yakıt akışının az olduğu durumlarda DGT türbin çarklarına giren havayı azaltır, böylece istenen yüklere göre turbo gücünü optimize eder (Filipi ve ark. 2001).

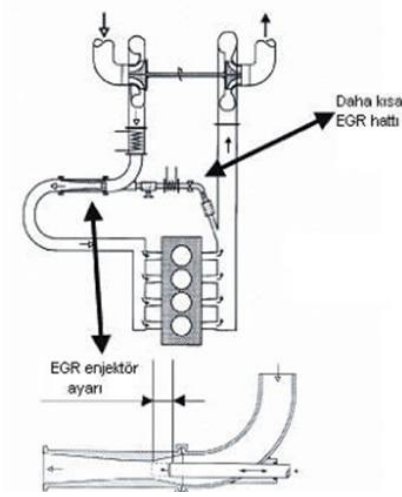
Motorun yüksek basınç üretimini sürdürmesi gerektiği durumlarda, hız/yük veya yüksek yakıt akışına göre, DGT hava giriş kısmını iyice açar bunun yanında turboşarjın aşırı hızlı dönüşüne de izin vermez. EGR sistemi, yanma odası içerisindeki hava-yakıt karışımını egzoz gazları ile seyrelterek yanma sonu sıcaklıklarını, dolayısıyla üretilen NO_x miktarını azaltmaktadır (Leet ve ark. 1998).

Hem EGR hem de türbin çalışması egzoz gazları tarafından sağlanmaktadır. Bu durum EGR ve türbin arasında güçlü bir bağlantı olduğunu göstermektedir. Geleneksel kontroller bu bağlantıyı ihmal ederken, DGT' yi artan basıncı kontrol etmek için EGR valfini de havanın kütleli debisini kontrol etmek için kullanır. Son zamanlarda yüksek hızlı dizel motorlarında EGR ve DGT kontrolü koordineli olarak sağlanmaktadır (Nieuwstadt ve ark. 2000). EGR sisteminin kısa yoldan emme manifolduna bağlanması ve emme manifolduna ventüri konulması, uzun yollu bağlantılardan çok daha fazla NO_x emisyonlarını azaltmıştır (Lundqvist ve ark. 2000).

Şekil 2.19 ve Şekil 2.20' de ventürlü tip EGR sistemi ve emisyon iyileştirmeleri gösterilmiştir. Bu sistemde EGR valfi olarak enjektör kullanılmış böylece sistem çok daha basit kontrol edilebilmiştir. Ayrıca motorun geçici rejimlerinde de EGR' nin çok hızlı cevap verebildiği gözlenmiştir.



Şekil 2.19. Temel EGR ve kısa hatlı ventürlü EGR karşılaştırması



Şekil 2.20. Ventürili Tip EGR sistemi

2.3.4 EGR' nin motor performansına ve egzoz emisyonlarına etkisi

Genel olarak hava-yakıt karışımının oranını değiştirmenin egzoz gazı emisyonlarını azaltma konusunda kayda değer sonuçları vardır. Hava-yakıt karışımının oranını zenginden stokiometrik (kimyasal koşulların gerektirdiği sınırlar korunarak) hale düşürmek hem karbonmonoksiti hem de yanma sırasında meydana gelen hidrokarbon ürünlerini azaltır; fakat bu NO_x oluşumunu sürekli artan bir eğilime sürükler. Bu oranı daha da arttırdığımızda, (18:1, 20:1 gibi) NO_x oluşumu azalır fakat bu durumda tolere edilemeyecek şekilde motorda düzensizlik ve performans düşüklüğü meydana gelir.

Egzoz emisyonundaki azot oksitlerinin miktarını azaltmanın bir yolu silindirlerdeki yanabilir dolgu sıcaklığını düşürmektir. Bu sayede azot ile oksijen arasında reaksiyon meydana gelmez veya bu reaksiyonun sadece küçük bir kısmı tamamlanabilir.

Bu yol, egzoz gazının bir kısmı silindirlere geri gönderilerek veya karbondioksit, su buharı, veya azot gibi reaksiyona girmeyecek gazları yanabilir karışımın içine sürerek, karışımın yoğunluğunun azaltılması ve bunun sonucunda da yanma prosesi sırasında sıcaklığın düşmesiyle gerçekleştirilebilir. Havada bulunan azot ve oksijen tarafından meydana getirilen azot oksitler yanma sıcaklığının bir fonksiyonudur ve yanma

sıcaklığındaki çok küçük bir düşüş, azotoksit oluşumunda kayda değer bir azalma meydana getirir.

Silindirlere çıkan egzoz gazının geri döndürülmesinin iki önemli etkisi vardır:

1. Silindir içine geri dönen egzoz gazlarının yanma sonu sıcaklığını düşürür. Çünkü geri döndürülmüş egzoz gazı yanma prosesinde görev almaz, fakat yanma sırasında oluşan sıcaklığın bir miktarını emer.

2. Belirli bir yük ve hız koşulunda silindirlere içeri giren taze hava-yakıt karışımının toplam miktarını azaltır.

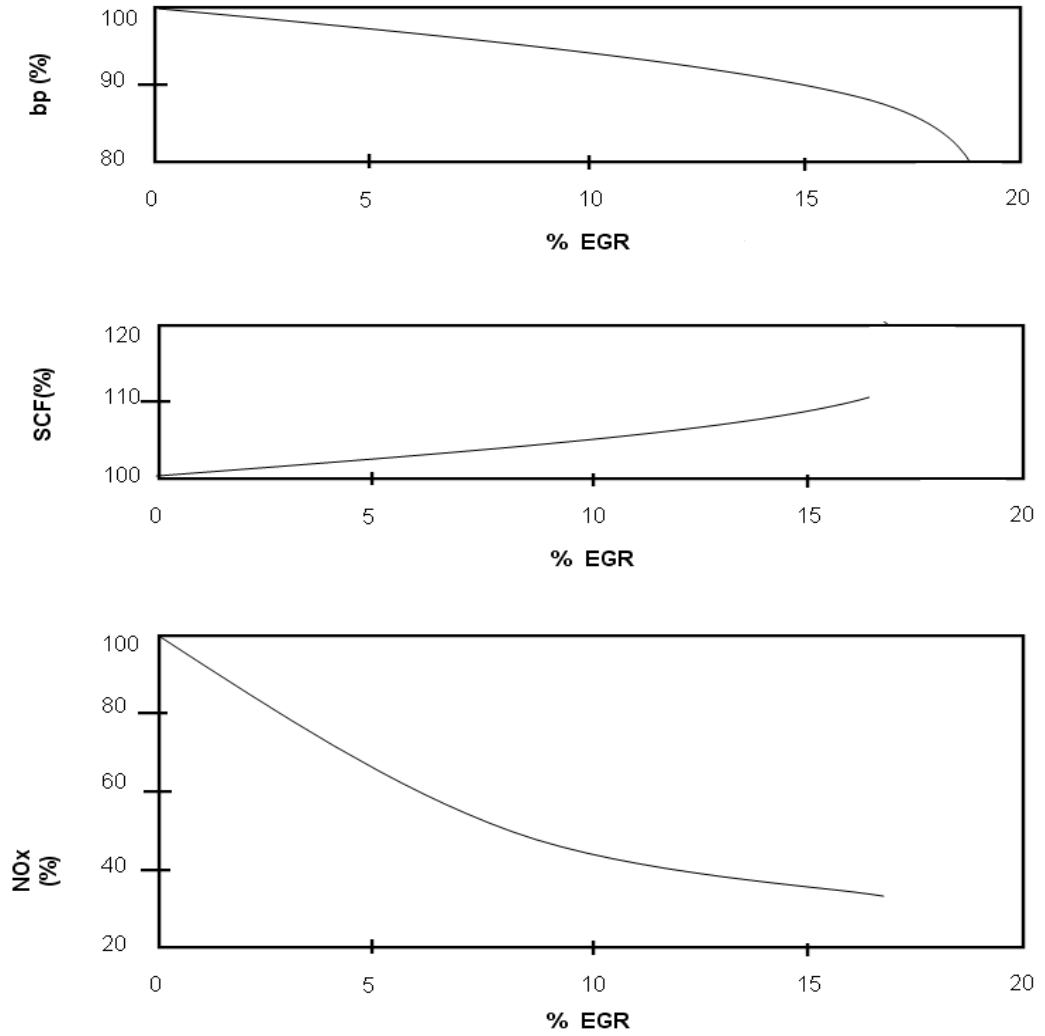
Şekil 2.21’ de gösterildiği üzere egzoz gazı geri dönüşümünün motor gücü, özgül yakıt tüketimi ve azotoksit emisyonları üzerindeki direkt etkileri geri dönüşümü yapılan egzoz gazının yüzdesine bağlıdır. Yapılan araştırmalara göre egzoz gazı geri dönüşümünün artırılmasıyla motor gücü düşmekte ve bununla birlikte özgül yakıt tüketimi artmaktadır. Bunun yanında geri dönüşüm % 15’ e kadar azotoksit yüzdesi sürekli olarak azalmaktadır. Fakat bu değerden sonra azot oksit yüzdesindeki düşüş çok küçük değerlerde olmaktadır. Araştırmalar incelendiğinde egzoz gazı geri dönüşümünün % 15 olduğu durumda azot oksitleri % 88 oranında azalmakta, fakat % 16 oranında bir güç kaybı ve yakıt tüketiminde de yaklaşık % 14’ lük bir artış gözlenmektedir. Egzoz geri dönüşümünün güç ve yakıt tüketimindeki olumsuz etkileri ateşleme avansının ve hava-yakıt oranının optimize edilmesiyle iyileştirilebilir (Heisler 1995).

Egzoz gazı dönüşümünde genel olarak rölanti motor hızında egzoz gazı geri dönüşümü yoktur ve düşük hızlarda kararlı çalışmanın korunması için EGR kullanılması istenmez. Egzoz gazı geri dönüşümünün yüksek değerlerinde maksimum hıza doğru yaklaşıldıkça EGR hızla düşmeye başlar.

Diğer pek çok otomotiv cihazında olduğu gibi, diyafram yolu ile vakum, EGR akışı kontrol valfini çalıştıracak gücü sağlar. Fakat buna ek olarak günümüzde kullanılan sistemler elektronik kontrollü EGR akış kontrolüne sahiptirler. Ateşleme kontrol

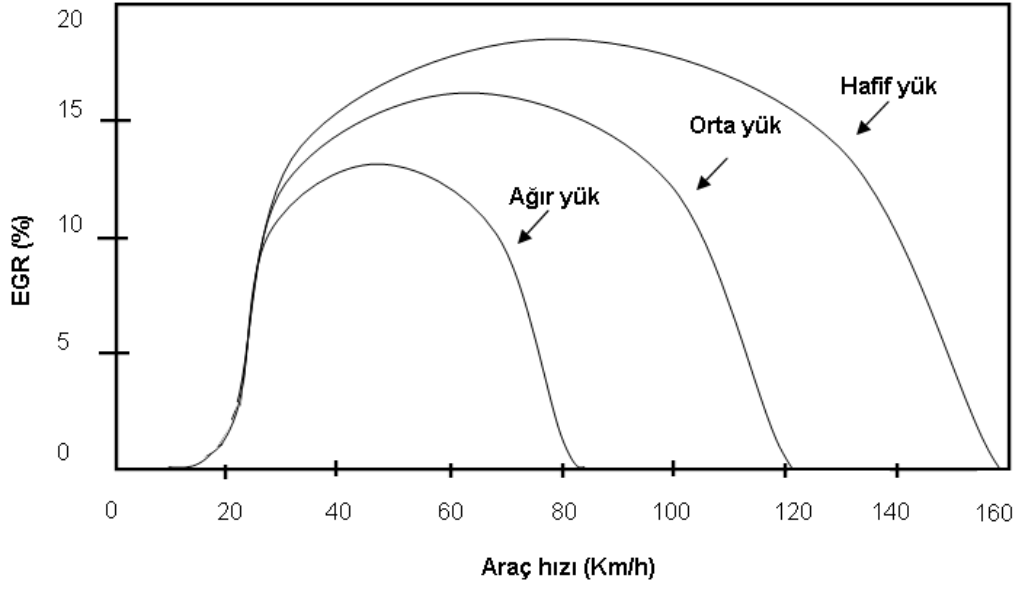
sistemine benzer bir yapıda motorun beyninde toplanan verilerden yola çıkarak yanma odasına gönderilmesi gereken egzoz gazı miktarı ayarlanmaktadır.

Emme manifolduna giren H/Y karışımına direkt olarak etki eden egzoz gazları motor gücünü ve NO_x miktarını düşürmekte, özgül yakıt tüketimini arttırmaktadır. EGR' nin değişik araç hızlarına bağlı olarak değişimi Şekil 2.21' de gösterilmiştir.



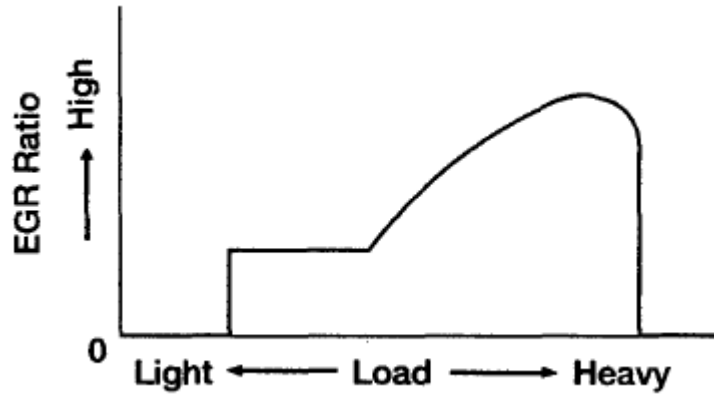
Şekil 2.21. EGR oranının motor gücü, özgül yakıt tüketimi ve NO_x' lere etkisi

Araç hızının artmasına bağlı olarak yapılan EGR miktarında da bir artış görülmektedir. Şekil 2.22' de araç hızına bağlı olarak değişik yüklerdeki EGR karakteristikleri görülmektedir.



Şekil 2.22. Değişik hızlardaki EGR karakteristikleri

Şekil 2.23' de ise egzoz geri dönüşüm oranının motor yüküne bağlı olarak değişim görülmektedir.



Şekil 2.23. EGR oranının motor yüküne bağlı değişimi

3. DENEYSEL ÇALIŞMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

3.1 Test Ekipmanları

Deneyleyler Horiba marka (Mexa 7400 Hetr, Vets 7000, CVS 7300-T) emisyon ölçüm cihazı ve Capelec CAP3200 dizel duman ölçer kullanılarak Şekil 3.1' de gösterilen düzenek ile gerçekleştirilmiştir.

Test için gerekli şartlar ve ekipmanlar; Laboratuarda bulunan ekipmanlara ait özellikler aşağıda verilmiştir.

Şasi dinamometresi: 200 km/h maksimum hıza, 150 kW maksimum güce ve 5400 N maksimum kuvvete sahiptir.

Gaz analiz sistemi: 70/220/EEC Emisyon Ana Direktifi ve tadilleri ve 70/220/EC Yakıt Sarfiyat Ana Direktifi ve tadilleri doğrultusunda ölçme kabiliyetine sahiptir. Birim saniyede model analiz, egzoz çıkış model analizi, seyreltilmiş egzoz gazı model analizi, katalizör verimi, her analizatörde 4 ayrı okuma aralığında okuma yapabilme ve her testte otomatik kalibrasyon yapabilme özelliklerine sahiptir.

Klimatik test odası: -35 / +45 °C yüksüz, yüklü maksimum -10 °C arasında sıcaklık kontrolü yapabilme, +5 °C' nin üzerindeki sıcaklıklarda % 10 ile % 90 arası nem kontrolü yapılabilme özelliğine sahiptir. Ayrıca aracın test sırasında tükettiği taze havanın sıcaklığını kontrol edebilme özelliğine sahip olup, 20 km/h ile 120 km/h arası şasi dinamometre simülasyonlu motor soğutma fanına da sahiptir.

Şartlandırma odası: -20 / +45 °C arasında sıcaklık kontrolü yapılabilmesi özelliğine sahiptir.

Örnekleme torbaları: 35 °C de ısıtılan örnekleme torbaları ile olası yoğuşmaların önüne geçilerek gaz konsantrasyonlarının daha doğru okunmasını sağlanmaktadır.

Ortam havası şartlandırıcısı: Euro 4 seviyesinde yaklaşık 6 g/kg değerinde nem sözkonusu iken, Euro 5 seviyesinde 2-3 g/kg nem öngörüsü bulunmaktadır. Bu nedenle yağışmaların önüne geçilebilmesi için egzoz gazını seyreltme amaçlı alınan ortam havası kurutularak sisteme alınmaktadır.

Deneylerde kullanılan motorun özellikleri Çizelge 3.1’ de, kullanılan yakıtlara ait özellikler ise Çizelge 3.2’ de ve Çizelge 3.3’ de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Deneylerde kullanılan motor parametreleri

Model	1.3 Multijet
Silindir adeti ve yerleşimi	4 silindir - tek sıra yatay
Silindir hacmi (cc)	1248
Sıkıştırma oranı	17.6/1
Maksimum hız (km/saat)	157
Maksimum güç (hp-d/d)	75-4000
Maksimum tork (Nm-d/dk)	190/1750
Yakıt besleme	Elektronik kontrollü Common Rail tipi Multijet direkt enjeksiyon,turbo ve intercooler
Ateşleme	Sıkıştırma
Çap x strok (mm)	69.9 x 82

Çizelge 3.2. Deneyde kullanılan soya yağı metil ester özellikleri

Özellikler	Soya Yağı Metil Esteri
Karbon (kütlese %)	77,10
Hidrojen (kütlese %)	11,81
Oksijen (kütlese %)	10,97
C/H ratio	6,53
Kükürt (kütlese %)	<0,005
Setan sayısı	51.50
Üst ısıl değer (kJ/kg)	39,900
Alt ısıl değer (kJ/kg)	37,388
Yoğunluk (g/cm ³ -21 °C)	0,878
Akma noktası	-7
Asit değeri (mg KOH/g)	0,19
Parlama noktası (°C)	87

Çizelge 3.3. Deneyde kullanılan dizel yakıt özellikleri

ÖZELLİK	BİRİM	DEĞER	SINIR	SONUÇ	DENEY YÖNTEMİ
Yoğunluk (15°C)	kg/m ³	820-845		0.84	EN ISO 375
Polisiklik aromatic hidrokarbonlar	% ağırlık	11	En çok	0.21	TS EN 12916
Parlama noktası	°C	55	En az	60	EN 22719
Soğuk filtre tıkanma noktası	°C	-20	En çok	(-21)	TS EN 116
Damıtma					TS 1232 EN ISO 3405
İlk kaynama noktası	°C	raporlanır		161.6	
%10 nun geçtiği nokta	°C	raporlanır			
250°C elde edilen	% hacim	65	En çok	36.7	EN ISO 3405
350°C elde edilen	% hacim	85	En az	93.7	
360°C elde edilen	% hacim	95	En az	354.4	
Son kaynama noktası	°C	raporlanır			
Kükürt	mg/kg	50	En çok	11	ASTM D 2622
Karbon kalıntısı (%10 damıtma kalıntısından)	% ağırlık	0.2	En çok	<0.1	EN ISO 10370
Vizkosite (40°C)	est	2.0-4.5		2.784	EN ISO 3104
Bakır şerit korozyonu (3 saat 50°C)	Derece	No.1	En çok	1A	EN ISO 2160
Kül	% ağırlık	0.01	En çok	<0.001	TS 10317 EN ISO 5165
Setan indisi	hesapla	49	En az	51.8	EN ISO 4264
Setan sayısı		51	En az	51	TS 10317 EN ISO 5165
Su	mg/kg	200	En çok	50	ASTM D 6304
Toplam kirlilik	mg/kg	24	En çok	11	TS EN 12662
Oksidasyon kararlılığı	g/m ³	25	En çok	tbr	TS EN ISO 12205
Yağlama özelliği 60°C Düzeltilmiş aşınma izi çapı	µm	460	En çok	399 <1.7	TS EN ISO 12156-1

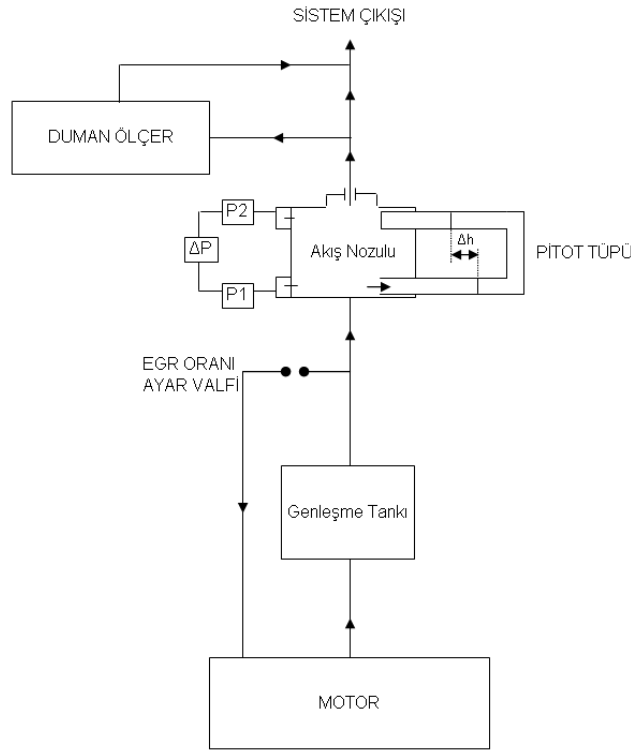
Deneylerde Horiba marka (MEXA 7400 HETR, VETS 7000, CVS 7300-T) emisyon ölçüm cihazı ve Capelec CAP3200 dizel duman ölçer kullanılmıştır. Cihaz benzinli araçlarda 4 gaz analizi, dizel araçlarda duman ölçümü veya hem benzinli hem de dizel araçlarda egzoz gaz ölçümü yapmak için kullanılmaktadır. Cihazın yaptığı ölçümler TS 11365 ve TS 11366' ya uygundur. Ölçüm sonucunda araçların egzozundan çıkan CO, CO₂, HC, O₂ gazları, duman koyuluğu ölçülebilmektedir. NO_x ölçümü ise opsiyoneldir. Üzerine monte edilmiş yazıcısı ile sonuçları rapor halinde almak mümkündür. Cihazın hassasiyeti Çizelge 3.4' de görülmektedir.

Çizelge 3.4. Duman ölçme cihazı hassasiyeti

PARAMETRE	ÖLÇME ARALIĞI	AYIRICILIK
HC	0 – 20000 ppm	1ppm
CO	0 – 15 %	0,001 %
CO2	0 – 20 %	0,1 %
O2	0 – 21.7 %	0.01 %
LAMBDA	0.6– 1.2	0.001
NOx	0 - 5000 ppm	1 ppm
N	0 - 100%	0.1 %
K	0.00 - 9.99	0.01

3.2 Deneysel Yöntem

Motorda yanma sonucu oluşan egzoz gazları önce aşırı doldurma (turbo) ünitesinde türbin kısmına girerek, merkezi bir mil ile türbine bağlı kompresörde emme havası miktarının ve dolgu basıncının artırılmasını sağlar. Gazlar turbo çıkışından sonra egzoz gazları içindeki basınç dalgalanmalarını gidermek ve soğutma amacı ile genişleme tankına gönderilir. Genişleme tankı çıkışından sonra bir hat ile emme manifolduna egzoz gazı gönderilmekte ve bu hat üzerinde bulunan bir valf yardımı ile EGR oranları ayarlanmaktadır. EGR hattı girişinden sonra bir akış nozulu ile egzoz gazı kesidi içinde bir basınç farkı yaratılır. Nozul girişi ve çıkışı arasında oluşan basınç farkını ölçebilmek amacıyla bu noktalara pitot tüpü bağlanmıştır. Nozul çıkışından sonra devam eden egzoz gazlarının bir kısmı duman ölçüm cihazına ayrı bir hat ile aktarılır. Burada duman miktarı ölçümü için çeşitli işlemlerden sonra filtrelerden geçirilen egzoz gazları cihazdan dışarı bırakılır. Geri kalan egzoz gazları daha sonra Şekil 3.1’ de görüldüğü gibi duman ölçüm cihazından çıkan egzoz gazları ile birleşerek sistemden dışarı atılır.



Şekil 3.1. Deney düzeneği

Deneyle üç aşamada gerçekleştirilmiştir. Her aşamada % 10, 15, 20, 25 ve 30 EGR oranı kullanılmıştır. Birinci aşamada dizel yakıtı kullanılarak, seçilen parametreler (CO, HC, NO_x, duman yoğunluğu, motor gücü, özgül yakıt tüketimi) EGR' li ve EGR' siz olmak üzere devir sayısına bağlı olarak ölçülmüştür. İkinci aşamada deney şartları ve kullanılan yakıt aynı olmak üzere dizel oksidasyon katalistinin EGR ile eş zamanlı kullanılmasının egzoz emisyonları (CO, HC, NO_x) üzerindeki etkisi incelenmiştir. Son aşamada ise deney şartları sabit tutularak dizel yakıtı yerine soya yağı metil esteri ve karışımlarının EGR ile kullanılması durumunda egzoz emisyonlarının ve motor parametrelerinin (CO, HC, NO_x, duman yoğunluğu, motor gücü, özgül yakıt tüketimi) ne yönde değiştiği incelenmiştir.

Deneyle aşağıdaki (3.1) EGR oranı kullanılmıştır.

$$EGR(\%) = \frac{Q_{EGZOZ(EGR'SİZ)} - Q_{EGZOZ(EGR'Li)}}{Q_{EGZOZ(EGR'SİZ)}} \times 100 \quad (3.1)$$

Emisyon testlerinde aynı şartlarda iki defa tekrarlanarak doğrulama sağlanmıştır. İki test arasında %25' ten fazla fark olmadığı durumlarda testler geçerli kabul edilmiştir. Testler arasında fark olması durumunda 3. test yapılarak birbirine yakın sonuçlar doğru kabul edilmiştir.

%25' lik farkın hesaplanması : $((1-\text{değer}-2.\text{değer}) / 1.\text{değer}) \cdot 100$ formülü ile hesaplanmıştır.

EGR oranı ayarlandıktan sonra 3 dakika kadar beklenerek motorun rejime girmesi beklenmiştir. Testler öncesinde uygun şartlar altında 36 saat şartlandırma sağlanmış olup, sistemden alınan egzoz gazları örnekleme torbalarında maksimum 20 dk bekletilerek test edilmiştir.

Belirli bir işletme şartında hedeflenen bir emisyon değeri için yanmaya katılması gereken egzoz gazı miktarı sabit olduğundan debi ölçümü taze dolgu havasıyla değil egzoz gazı ile yapılmış ve formülde değer olarak egzoz gazı değerleri alınmıştır. Burada $Q_{\text{EGZOZ}(\text{EGR}'\text{SİZ})}$ ifadesi toplam egzozun hacimsel debisi için, $Q_{\text{EGZOZ}(\text{EGR}'\text{Lİ})}$ ise motorun emme hattına geri gönderilmeden sistemden dışarı atılan egzozun hacimsel debisini ifade etmek için kullanılmıştır.

Egzoz hattı üzerine yerleştirilmiş akış nozulu giriş ve çıkışı arasında Bernoulli Denklemi yazılırsa;

$$\frac{P_1}{\gamma_1} + \frac{V_1^2}{2 \cdot g} + z_1 = \frac{P_2}{\gamma_2} + \frac{V_2^2}{2 \cdot g} + z_2 \quad (3.2)$$

Yukarıdaki eşitlikte (3.2) 1 ve 2 noktlarındaki özgül ağırlıklar, z_1 ve z_2 (1 ve 2 noktalarının referans alınan eksene olan yükseklikleri) aynıdır ($z_1 = z_2$, $\gamma_1 = \gamma_2 = \gamma$).

Böylece

$$\frac{P_1 - P_2}{\gamma} = \frac{V_2^2 - V_1^2}{2 \cdot g} \text{ eşitliği elde edilir } (P_1 - P_2 = \Delta P) . \quad (3.3)$$

1 ve 2 noktalarındaki hacimsel debilerin eşit olması nedeniyle ($Q_1 = Q_2 = Q$) aşağıdaki eşitlik (3.4) elde edilir.

$$Q = V_1 \cdot A_1 = V_2 \cdot A_2 \quad \text{buradan} \quad \frac{V_1}{V_2} = \frac{A_2}{A_1} \quad \text{‘ye ulaşılır.} \quad (3.4)$$

Yukarıdaki eşitlik (3.4) , denklem (3.5)’ de yerine yazılırsa, 1 ve 2 noktalarındaki basınç farkı için ;

$$\Delta P = \frac{\gamma \cdot V_2^2}{2 \cdot g} \left(1 - \frac{A_2^2}{A_1^2} \right) \quad \text{bulunur.} \quad (3.5)$$

Bu ifade (3.5) nozul çıkışındaki hacim için düzenlendiğinde (3.6) nolu denkleme ulaşılır.

$$V_2^2 = \frac{\Delta P \cdot 2 \cdot g}{\left[1 - \left(\frac{A_2^2}{A_1^2} \right) \right] \cdot \gamma} \quad (3.6)$$

$$M = \frac{1}{\sqrt{1 - (A_2/A_1)^2}} \quad \text{Kütleli debinin aynı nozul için sabit olması kullanılarak ;} \quad (3.7)$$

$$V_2 \cdot A_2 = \sqrt{\frac{2 \cdot g}{\gamma}} \cdot \sqrt{\Delta P} \cdot M \cdot A_2 = Q \quad \text{ifadesine ulaşılır.} \quad (3.8)$$

Herhangi iki hacimsel debi (Q) değeri için aynı nozulda $\sqrt{(2 \cdot g)/\gamma} \cdot M \cdot A_2$ ifadesi daima sabit olacağı için, Q değerleri oranı denklem (3.9)’ da görüldüğü gibi sadece basınç farklarına bağlıdır.

$$\frac{Q_0}{Q_x} = \sqrt{\frac{\Delta P_o}{\Delta P_x}} \quad (3.9)$$

Burada (3.9), sıfır alt indisli değerler belirli bir işletme şartı için % 0 EGR koşulunda, ΔP_0 akış nozulu giriş ve çıkışları arasında okunan basınç farkı, Q_0 ise nozuldan geçen akışkan miktarını göstermektedir. X alt indisli değerler ise aynı işletme şartı için belirli bir EGR oranında için ΔP_x akış nozulu giriş ve çıkışları arasında okunan basınç farkı,

Q_x ise nozuldan geçen akışkan miktarına karşılık gelmektedir. Çekilen egzoz gazı miktarı kadar nozuldan geçen gaz miktarı azalacağından örneğin % 10 EGR oranı için;

$$Q_x = 0.90 \cdot Q_1 = Q_{\%10} \quad (3.10)$$

olacaktır. Buna göre yukarıdaki debi oran formülü (3.10) uygulandığında;

$$\frac{Q_1}{Q_{\%10}} = \frac{1}{0.90} = \sqrt{\frac{\Delta P_1}{\Delta P_{\%10}}} \text{ ve buradan da } \Delta P_{\%10} = \Delta P_1 \cdot (0.90^2) \text{ elde edilir.} \quad (3.11)$$

Her işletme şartı için deneysel olarak bulunan ΔP_1 'ler ile (3.11) eşitliğinden yararlanılarak hesaplanan EGR oran değerleri için olması gereken basınç farkları EGR hattı üzerinde bulunan valf yardımı ile nozula bağlı pitot tüpünde oluşturulur veya tam tersi olarak oluşan basınç farkından yanmaya gönderilen EGR miktarına ulaşılır. Bu yöntemle yanmaya katılan egzoz gazı miktarı kontrol edilmektedir.

3.3 Deneysel Çalışmalar

3.3.1 Dizel yakıtı ile yapılan deneyler

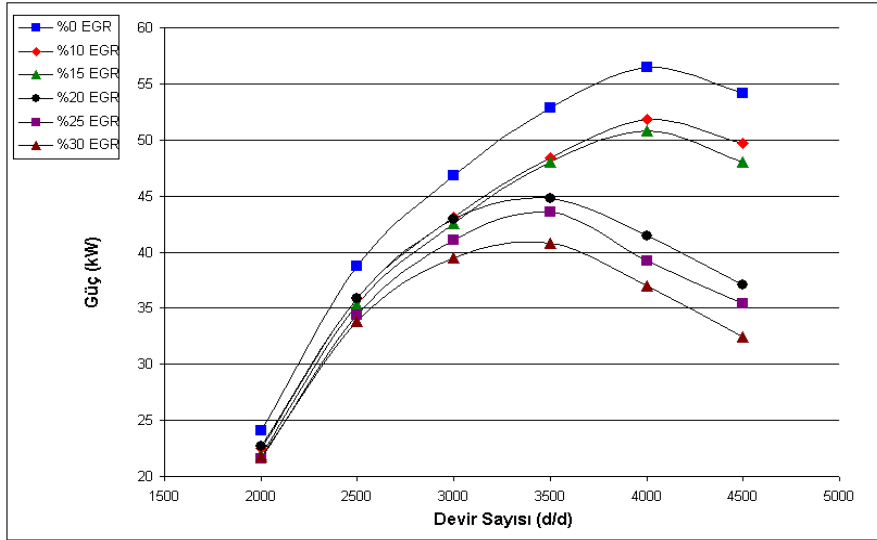
3.3.1.1 EGR' nin motor gücü üzerindeki etkisi

Deneyler 2000, 2500, 3000, 3500, 4000, 4500 devir/dakika' da yapılmıştır. Değiştirilen EGR oranlarına (% 10, 15, 20, 25, 30) göre motor gücünün devir sayısına bağlı olarak değişim değerleri Çizelge 3.5' de, değişim grafiği ise Şekil 3.2' de verilmiştir. Ölçüm yapılan devir sayılarında ve incelenen EGR oranlarında güçde azalma görülmüştür. % 10 EGR durumunda ortalama azalma % 7,75 iken EGR oranı % 30 olduğunda güçteki kayıp ortalama % 22,5 olmaktadır. 3000 devir/dakika' ya kadar EGR oranının arttırılması güç üzerinde çok büyük kayıplara yol açmamaktadır. Ancak yüksek devirlerde EGR oranının arttırılması ciddi kayıplara neden olmaktadır. En yüksek kayıp % 40,13 ile 4500 devir/dakika' da EGR oranının % 30 olduğu anda gözlenmiştir.

Artan EGR oranı ile taze dolgu havası içindeki oksijen miktarının azalması, yanmanın kötüleşmesine, yanma hızının yavaşlamasına ve ortaya çıkan ısı enerjisinin azalmasına neden olmaktadır. Bu değişimlerin sonucu olarak da motor gücü düşmektedir.

Çizelge 3.5. Dizel yakıtı için farklı EGR oranlarındaki motor gücü değerleri

Yük No	Devir Sayısı (d/d)	%0 EGR (kW)	%10 EGR (kW)	%15 EGR (kW)	%20 EGR (kW)	%25 EGR (kW)	%30 EGR (kW)
1	2000	24.05	22.51	21.97	22.70	21.60	21.76
2	2500	38.75	35.90	35.34	35.91	34.40	33.82
3	3000	46.84	43.15	42.57	42.88	41.10	39.45
4	3500	52.85	48.43	48.00	44.80	43.57	40.83
5	4000	56.52	51.80	50.78	41.41	39.20	37.00
6	4500	54.12	49.70	48.00	37.08	35.41	32.40



Şekil 3.2. Dizel yakıtı için farklı EGR oranlarındaki motor gücü değişimi

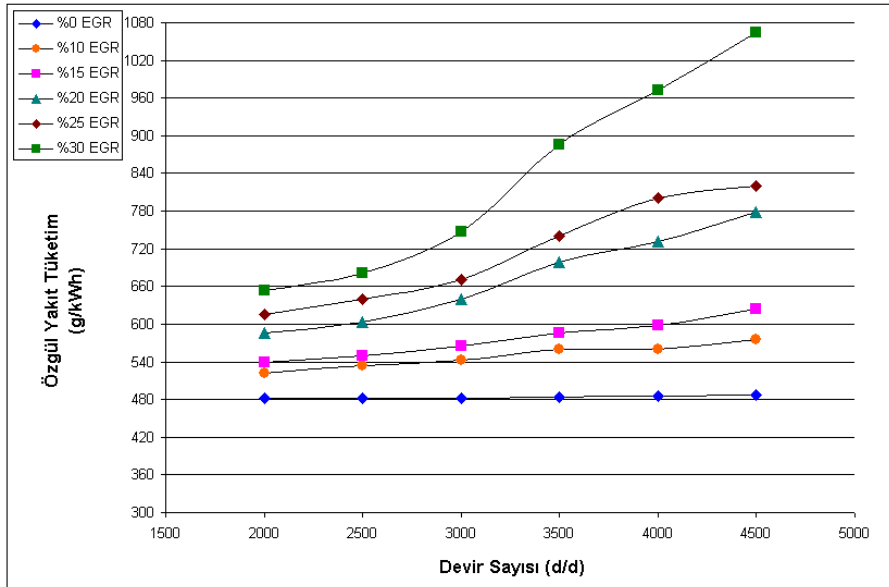
3.3.1.2 EGR' nin özgül yakıt tüketimi üzerindeki etkisi

EGR' nin özgül yakıt tüketimi üzerindeki etkisi, motor gücü üzerindeki etkisine benzemektedir. Şekil 3.3 ve Çizelge 3.6' da gösterildiği üzere % 10 EGR durumundaki ortalama yakıt tüketimi artışı % 13,45 iken % 30 EGR durumunda bu değer % 72,25 olmaktadır. Artan devir sayılarında EGR oranının arttırılması yakıt tüketimini

kötüleştirmiştir. EGR oranı % 10 ve % 15’ de yüksek devirlerde bile yakıt tüketimi çok artmamaktadır ancak yüksek devirlerde EGR oranının % 15’ in üzerine çıkması yakıt tüketimi anlamlı bir şekilde kötüleştirmektedir.

Çizelge 3.6. Dizel yakıtı farklı EGR oranlarındaki yakıt tüketimi değerleri

Devir Sayısı (d/d)	%0 EGR (g/kWh)	%10 EGR (g/kWh)	%15 EGR (g/kWh)	%20 EGR (g/kWh)	%25 EGR (g/kWh)	%30 EGR (g/kWh)
2000	481.20	522.12	539.99	585.28	615.00	654.34
2500	481.90	534.05	550.03	603.86	640.05	681.94
3000	482.80	543.00	565.45	640.30	670.78	747.23
3500	484.20	560.16	585.67	698.76	740.44	886.02
4000	485.90	560.58	598.45	732.21	800.30	972.38
4500	487.95	576.36	625.00	777.71	820.50	1063.90



Şekil 3.3. Dizel yakıtı için farklı EGR oranlarındaki özgül yakıt tüketimi

3.3.1.3 EGR' nin duman yoğunluğu üzerindeki etkisi

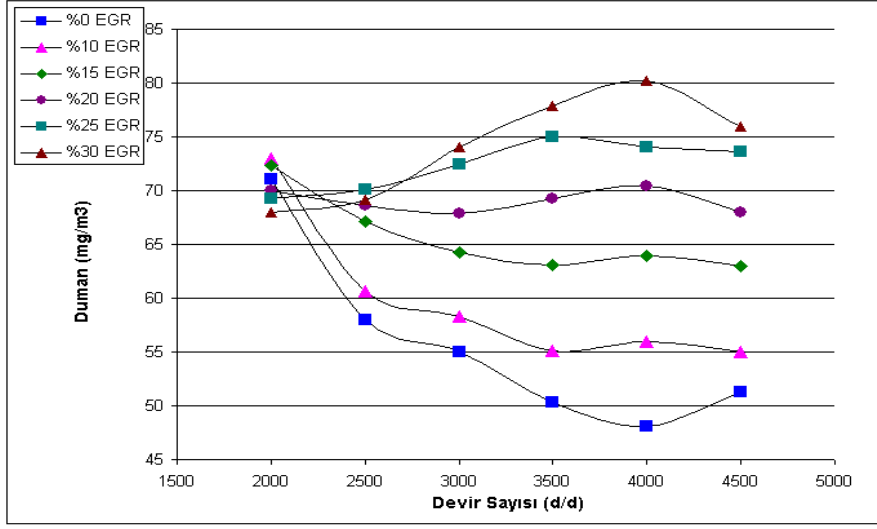
Çizelge 3.7' de devir sayısına bağlı olarak değişen EGR oranları için duman yoğunluğu değerleri, Şekil 3.4' de ise devir sayısına bağlı farklı EGR oranlarındaki duman yoğunluğu grafiği görülmektedir.

Deney başlangıç değeri olan 2000 devir/dakika' da tüm EGR oranlarındaki duman yoğunlukları birbirine çok yakındır ve her durumda standart değer in altındadır. Artan devir sayısı ve EGR oranına bağlı olarak lambda değerinin azalması duman yoğunluğunun artışına neden olmaktadır.

% 10 EGR durumundaki ortalama artış % 7,8 iken EGR oranı % 30 olduğunda bu değer % 40,7 olarak tespit edilmiştir. Yüksek devirlerde silindir içindeki oksijen miktarının azalması ve EGR' nin alev sıcaklığını düşürmesi sonucu yakıt oksidasyonunun tamamlanamaması sebebiyle duman yoğunluğu artmaktadır.

Çizelge 3.7. Dizel yakıtı için farklı EGR oranlarındaki duman yoğunluğu

Yük No	Devir Sayısı (d/d)	%0 EGR (mg/m ³)	%10 EGR (mg/m ³)	%15 EGR (mg/m ³)	%20 EGR (mg/m ³)	%25 EGR (mg/m ³)	%30 EGR (mg/m ³)
1	2000	71.11	73.00	72.31	70.01	69.25	68.03
2	2500	58.00	60.63	67.16	68.67	70.13	69.11
3	3000	54.98	58.33	64.30	67.88	72.45	74.00
4	3500	50.29	55.14	63.10	69.29	75.04	77.90
5	4000	48.07	56.00	63.89	70.45	74.00	80.23
6	4500	51.24	55.03	62.99	68.00	73.65	76.00



Şekil 3.4. Dizel yakıtı için farklı EGR oranlarındaki duman yoğunluğu

3.3.1.4 EGR' nin CO emisyonları üzerindeki etkisi

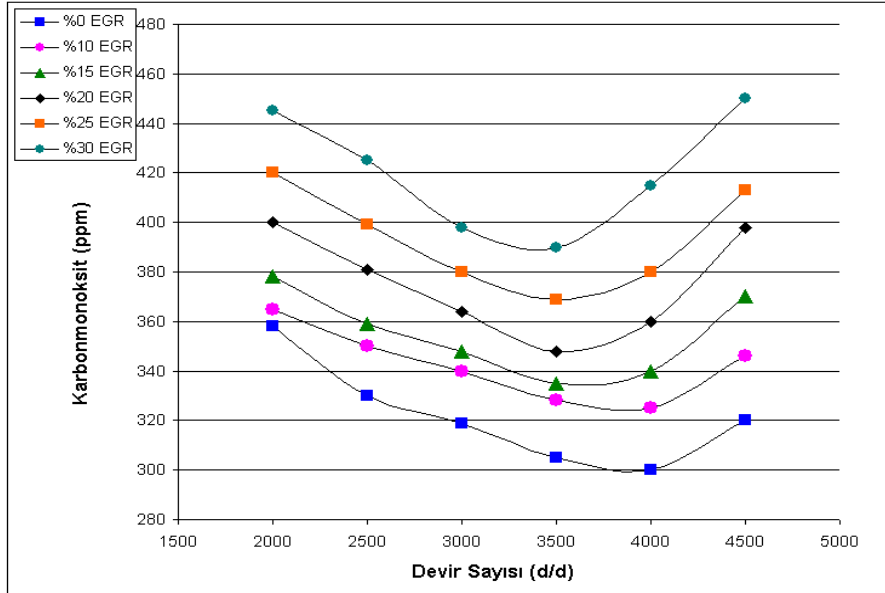
Şekil 3.5' de devir sayısına bağlı olarak değişen EGR oranları için karbonmonoksit emisyonundaki değişim grafiği, Çizelge 3.8' de ise değişim değerleri görülmektedir. Karbonmonoksit emisyonları hava / yakıt oranı ile değişim gösteren bir egzoz emisyonu ürünüdür ve yanma işlemi sırasında yakıtın tam yanmamasından kaynaklanır.

Gaz sıcaklığının düşük olması, yeterli oksijenin bulunmaması ve CO_2 ' e dönüşüm süresinin kısa olmasından dolayı yanmanın tamamlanmamış olması CO miktarını artırır. Artan EGR oranı ile birlikte yanmaya katılan taze dolgu havası içindeki O_2 miktarı da azalmaktadır. Azalan taze dolgu havası miktarı nedeni ile lambda düşmekte yani karışım zenginleşmekte, yanma kötüleşmekte bunun sonucunda da karbonmonoksit emisyonu artan bir eğri karakteristiği göstermektedir.

% 10 EGR uygulamasının CO emisyonu üzerindeki artış etkisi % 6 iken EGR oranı % 30' a yükseltildiğinde emisyon artışı ortalama % 30,7' ye yükselmektedir.

Çizelge 3.8. Dizel yakıtı için farklı EGR oranlarındaki CO değerleri

Yük No	Devir Sayısı (d/d)	%0 EGR (ppm)	10% EGR (ppm)	%15 EGR (ppm)	%20 EGR (ppm)	%25 EGR (ppm)	%30 EGR (ppm)
1	2000	358	365	378	400	420	445.00
2	2500	330	350	359	381	399	425.00
3	3000	319	340	348	364	380	398.00
4	3500	305	328	335	348	369	390.00
5	4000	300	325	340	360	380	415.00
6	4500	320	346	370	398	413	450.00



Şekil 3.5. Dizel yakıtı için farklı EGR oranlarındaki CO emisyonları

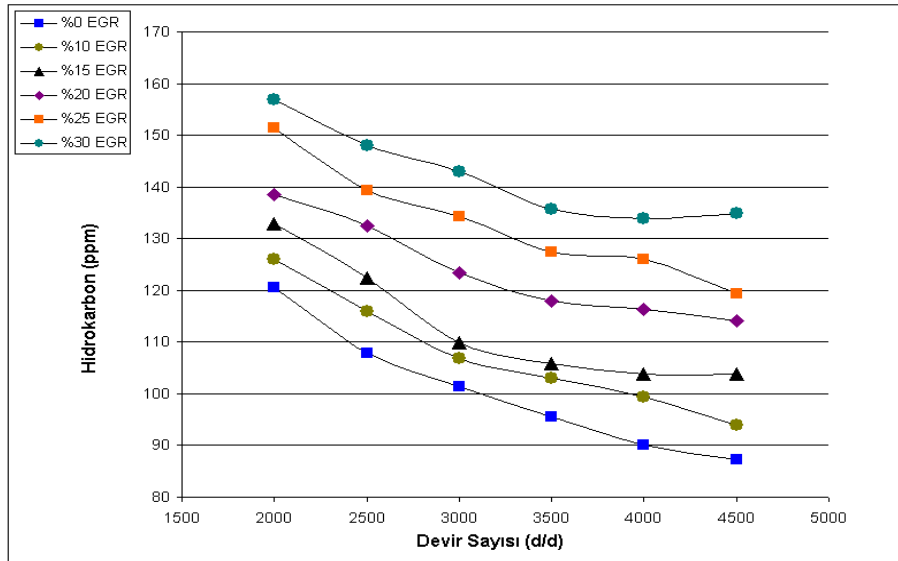
3.3.1.5 EGR' nin HC emisyonları üzerindeki etkisi

Şekil 3.6 ve Çizelge 3.9' da görüldüğü gibi EGR uygulamasının HC emisyonları üzerindeki olumsuz etkisi CO emisyonlarından daha fazla olmuştur. % 10 EGR uygulamasının HC emisyonu üzerindeki artış etkisi % 7,2 iken EGR oranı % 30' a yükseltildiğinde emisyon artışı ortalama % 42' ye yükselmektedir. Artan EGR oranı ile hidrokarbon emisyonlarının artış nedeni karbonmonoksit emisyonlarının artışı ile

benzerlik göstermektedir. HC emisyonlarının EGR ile artmasındaki asıl neden HFK’ daki artış sebebiyle yanmanın kötüleşmesidir.

Çizelge 3.9. Dizel yakıtı için farklı EGR oranlarındaki HC değerleri

Yük No	Devir Sayısı (d/d)	%0 EGR (ppm)	%10 EGR (ppm)	%15 EGR (ppm)	%20 EGR (ppm)	%25 EGR (ppm)	%30 EGR (ppm)
1	2000	120.6	125.95	132.89	138.5	151.45	156.89
2	2500	107.9	115.89	122.4	132.56	139.25	147.95
3	3000	101.3	106.78	109.88	123.47	134.36	142.99
4	3500	95.46	102.96	105.85	117.89	127.49	135.79
5	4000	90.14	99.40	103.73	116.25	125.91	133.86
6	4500	87.2	93.97	103.86	114.09	119.32	134.91



Şekil 3.6. Dizel yakıtı için farklı EGR oranlarındaki HC emisyonları

3.3.1.6 EGR’ nin NO_x emisyonları üzerindeki etkisi

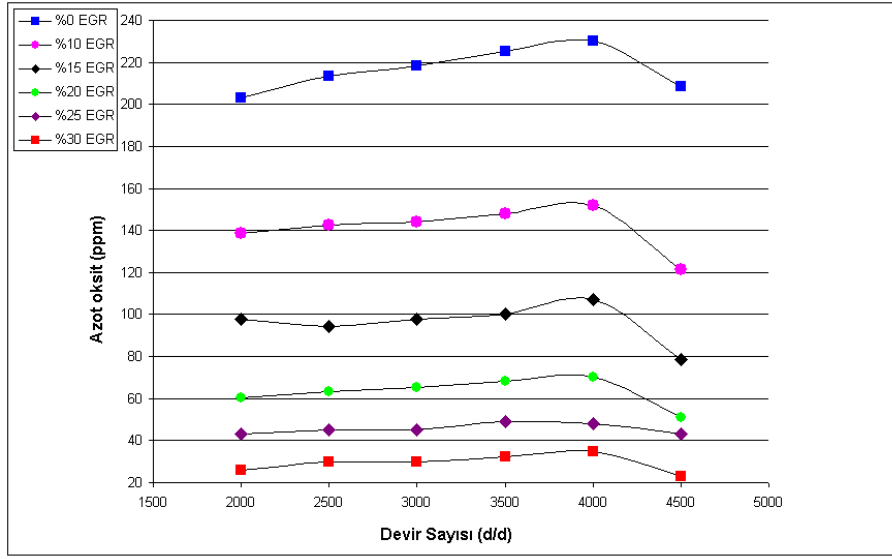
Şekil 3.7’ de devir sayısına bağlı farklı EGR oranlarındaki azotoksit emisyonlarının değişimi grafiği, Çizelge 3.10’ da değişim değerleri görülmektedir. Yapılan deneyler sonucunda azotoksit emisyonlarının ölçüm yapılan tüm EGR oranları için azaldığı tespit edilmiştir. EGR oranının % 15’ den sonra NO_x emisyonları üzerindeki azaltıcı etkisi

düşmektedir. % 10 EGR durumunda azotoksit emisyonlarında ortalama % 34,77 iyileşme gözlenirken bu değer % 30 EGR oranı için % 86,5' dir.

Motorlarda azotoksitler, son alev cephesindeki sıcak gazlarda oluşur. NO_x' in başlangıçtaki oluşum hızı kısmen sıcaklığa bağlıdır. Oksijen yoğunluğunun yüksek olması da NO_x oluşum hızını artırır. EGR ile silindir içindeki oksijenin bir kısmının yerini karbondioksit (CO₂) ve su (H₂O) aldığı için lokal oksijen yoğunluğu azalmaktadır. Bu durumda yakıt ve oksijen moleküllerinin buluşup reaksiyona girme ihtimali azalır. Buna bağlı olarak reaksiyon hızı ve lokal alev sıcaklığı düşerek, NO_x oluşumu azalmaktadır.

Çizelge 3.10. Dizel yakıtı için farklı EGR oranlarındaki NO_x değerleri

Yük No	Devir Sayısı (d/d)	%0 EGR (ppm)	%10 EGR (ppm)	%15 EGR (ppm)	%20 EGR (ppm)	%25 EGR (ppm)	%30 EGR (ppm)
1	2000	203.01	138.80	97.60	60.30	43.18	25.93
2	2500	213.23	142.78	94.47	63.25	45.22	29.80
3	3000	218.10	144.23	97.89	65.07	45.00	30.00
4	3500	225.31	147.97	100.11	68.19	48.88	32.25
5	4000	230.29	152.05	107.09	70.33	48.06	34.64
6	4500	208.40	121.37	78.45	50.96	43.00	23.01



Şekil 3.7. Dizel yakıtı için farklı EGR oranlarındaki NO_x emisyonları

3.3.2 Dizel yakıtı ile yapılan deneylerde katalist uygulaması

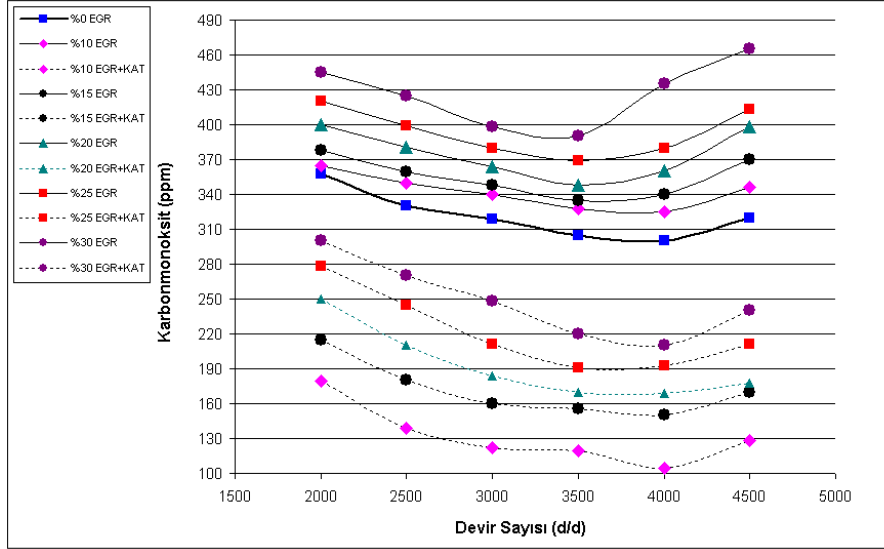
EGR etkisi ile artan CO ve HC emisyonlarını azaltmak amacıyla egzoz sistemine dizel oksidasyonlu katalist monte edilerek, deneyler aynı şartlarda tekrarlanmıştır. Katalistin iç yapısı farklı etkilere sahip katmanlardan oluşmaktadır. HC yakalama katmanında HC'lerin oksitlendirilmesiyle H₂ ve CO emisyonları elde edilir. Bu katmanın ürünleri NO_x yakalama katmanında N₂, CO₂ ve H₂O gazlarına dönüştürülür. Bu sayede egzoz çıkışındaki emisyonlarda iyileşme sağlanması beklenmektedir.

Şekil 3.8 ve Şekil 3.9' a göre tüm devir sayılarında ve artan EGR oranlarında CO ve HC emisyonlarında iyileşme gözlenmiştir.

Şekil 3.10' da ise devir sayısına bağlı farklı EGR oranlarındaki katalist uygulamasının azotoksit emisyonlarına etkisi görülmektedir. Her EGR oranı NO_x emisyonlarında yaklaşık % 10 daha fazla iyileşme gözlenmiştir.

Şekil 3.8' e göre tüm devir sayılarında ve artan EGR oranlarında karbonmonoksit emisyonlarında iyileşme gözlenmiştir. % 10 EGR+katalist uygulaması ile CO emisyonlarındaki ortalama azalış % 59,3 iken, % 30 EGR+katalist uygulaması ile

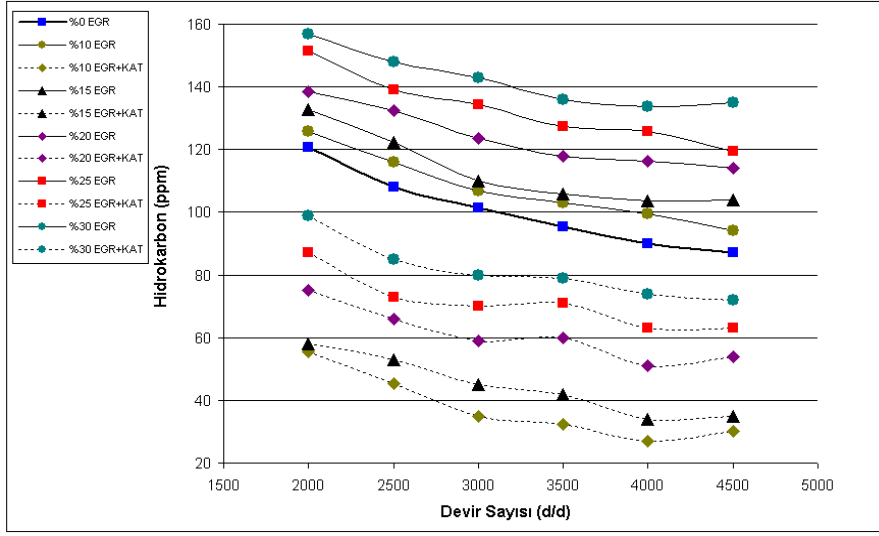
ortalama azalış % 23,25 olarak tespit edilmiştir. Sisteme oksidasyonlu katalist montesi ile EGR' nin CO emisyonları üzerindeki olumsuz etkisi yok edilmiştir.



Şekil 3.8. EGR+ katalist uygulamasının CO emisyonuna etkisi

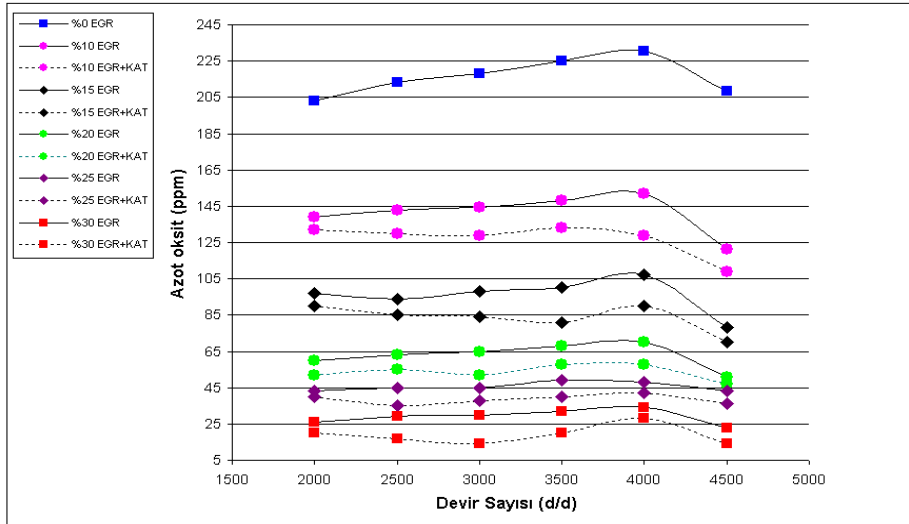
Şekil 3.9' a göre tüm devir sayılarında ve EGR oranlarında HC emisyonlarında iyileşme gözlenmiştir. %10 EGR+katalist uygulaması ile ortalama azalış, % 63,17, % 30 EGR+katalist uygulaması sonucundaki ortalama azalış ise % 18,79 olarak tespit edilmiştir.

Çalışmanın ilk aşamasında yapılan testlerde EGR' nin hidrokarbon emisyonlarını arttırdığı gözlenmişti. Aynı sisteme dizel oksidasyonlu katalist eklenmesi ile HC emisyonlarında önemli düşüşler görülmüştür. Bu düşüş artan devir sayısı ile orantılıdır ve elde edilen emisyon değerleri seçilen devir sayıları için ve EGR oranı için motorun %0 EGR durumundaki HC salınımının altındadır. Ancak dizel katalistin HC emisyonlarını iyileştirmesi artan EGR oranı ile azalmaktadır.



Şekil 3.9. EGR+katalist uygulamasının HC emisyonuna etkisi

Şekil 3.10' da ise devir sayısına bağlı farklı EGR oranlarındaki katalist uygulamasının azotoksit emisyonlarına etkisi görülmektedir. Katalist ilavesi ile her EGR oranı için NO_x emisyonlarında yaklaşık % 10 daha fazla iyileşme gözlenmiştir. %10 EGR durumunda azotoksit emisyonlarındaki azalma ortalama % 40,5' a (EGR' li durumda % 34,77) , % 30 EGR oranında ise % 91,6' ya (EGR' li durumda % 86,5) yükselmiştir.



Şekil 3.10. EGR+katalist uygulamasının NO_x emisyonlarına etkisi

3.3.3 Soya yağı metil esteri ile yapılan deneyler

Soya yağı metil esteri ile yapılan deneyler üç aşamada (B20, B50 ve B100) gerçekleştirilmiştir. Dizel yakıtı kullanılması durumundakine benzer şekilde deneyler aynı deney düzeneği kullanılarak ve aynı şartlar altında 2000, 2500, 3000, 3500, 4000 ve 4500 devir/dakika' da ve aynı EGR oranları (% 10, 15, 20, 25, 30) için tekrarlanmıştır. Deneylerde Çizelge 3.3' de özellikleri verilen soya yağı metil esteri (SYME) kullanılmıştır.

3.3.3.1 B20 deneyleri

EGR' nin motor gücü üzerindeki etkisi

% 20 soya yağı metil esteri + % 80 motorin karışımıyla elde edilen B20 yakıtının kullanılması, motor gücü üzerinde olumsuz etki yaratmıştır. Motor gücünde (dizel yakıtına göre) ortalama % 1,89 oranında düşüş görülmüştür.

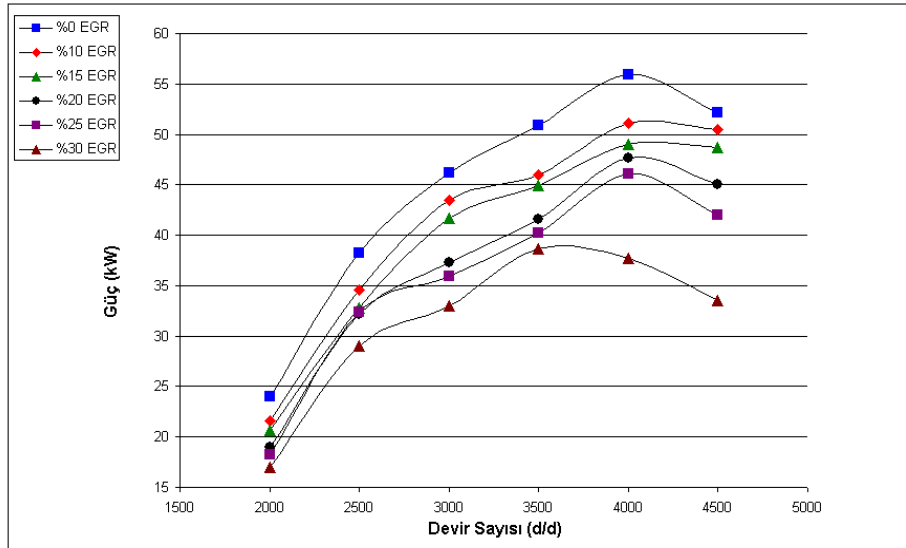
Bu durum yakıtların ısı değerlerinin (biyodizelin ısı değeri dizel yakıtına göre daha düşüktür) ve yanma sonucu ortaya çıkan basınç ve vizkosite değerlerinin farklı olmasından kaynaklanmaktadır. Motor devri arttıkça B20 yakıtı ile motorin arasındaki güç farkı da artmaktadır.

Şekil 3.11' de görüldüğü gibi EGR' nin B20 yakıtı kullanımı esnasındaki motor gücü üzerindeki etkisi dizel yakıtı kullanımı ile benzerlik göstermektedir.

Düşük EGR oranlarında dizel yakıtı ve B20 yakıtına ait güç değerleri birbirine yakındır. % 30 EGR durumunda dizel yakıtı için güçteki ortalama düşüş % 22,5 iken bu değer B20 için % 29' dur.

Çizelge 3.11. B20 yakıtı için farklı EGR oranlarındaki motor gücü değerleri

Yük No	Devir Sayısı (d/d)	%0 EGR (kW)	%10 EGR (kW)	%15 EGR (kW)	%20 EGR (kW)	%25 EGR (kW)	%30 EGR (kW)
1	2000	24.01	21.60	20.70	18.96	18.27	17.00
2	2500	38.24	34.58	32.75	32.16	32.35	29.00
3	3000	46.20	43.47	41.69	37.31	35.88	33.00
4	3500	50.88	46.02	44.98	41.53	40.24	38.60
5	4000	55.87	51.10	48.96	47.60	46.10	37.72
6	4500	52.18	50.48	48.70	45.07	42.00	33.50



Şekil 3.11. B20 yakıtı için farklı EGR oranlarındaki motor gücü

EGR' nin özgül yakıt tüketimi üzerindeki etkisi

% 20 soya yağı metil esterli + % 80 motorin karışımıyla elde edilen B20 yakıtının kullanılması, motor gücünde olduğu gibi yakıt tüketimi üzerinde de olumsuz etki yaratmıştır. Yakıt tüketiminde (motorine göre) ortalama % 5,43 oranında artış görülmüştür.

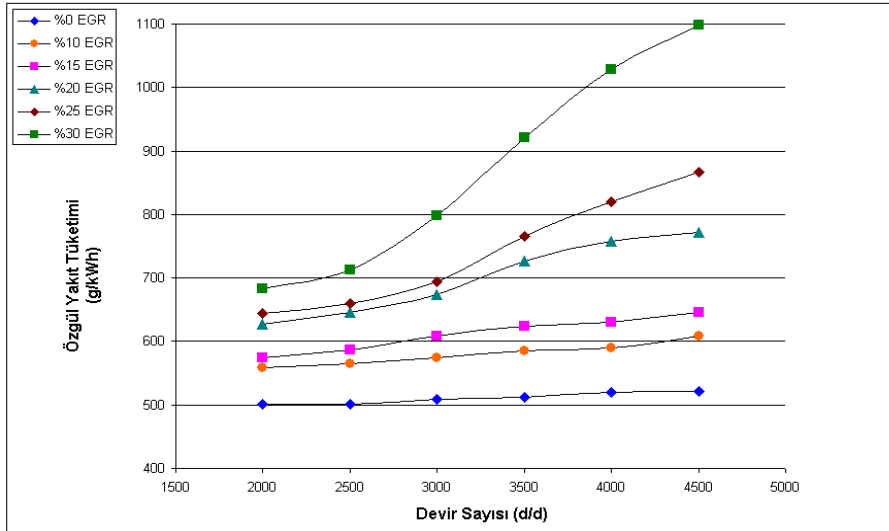
Şekil 3.12' de görüldüğü gibi EGR' nin B20 yakıtı kullanımı esnasındaki özgül yakıt tüketimi üzerindeki etkisi motorin kullanımı ile benzerlik göstermektedir. % 30 EGR

durumunda dizel yakıtı için özgül yakıt tüketimindeki ortalama artış % 72,23 iken bu değer B20 için % 70,72' dir.

Soya yağı metil esteri ve karışımlarının motorine göre daha düşük alt ısıl değerine sahip olması nedeniyle motorine yakın güç elde edebilmek için daha fazla yakıt gönderilmesi yakıt tüketimi arttırmaktadır. Her bir soya yağı metil esteri karışımı için optimum püskürtme basıncının belirlenmesi ile daha düşük özgül yakıt tüketimi elde edilebilir.

Devir Sayısı (d/d)	%0 EGR özgül yakıt tüketimi (g/kWh)	%10 EGR özgül yakıt tüketimi (g/kWh)	%15 EGR özgül yakıt tüketimi (g/kWh)	%20 EGR özgül yakıt tüketimi (g/kWh)	%25 EGR özgül yakıt tüketimi (g/kWh)	%30 EGR özgül yakıt tüketimi (g/kWh)
2000	500.39	558.02	573.69	627.48906	644.5131	682.69
2500	500.40	564.15	586.47	646.5168	660.0555	712.56
3000	508.28	574	609.11	673.471	694.54	797.93
3500	512.70	584.6	624	727.0086	765.826	920.40
4000	519.26	589.55	631	757.60034	819.4745	1028.53
4500	521.02	608.36	646.39	772.15164	866.913	1098.86

Çizelge 3.12. B20 yakıtı için farklı EGR oranlarındaki özgül yakıt tüketimi



Şekil 3.12. B20 yakıtı için farklı EGR oranlarındaki özgül yakıt tüketimi

EGR' nin duman yoğunluğu üzerindeki etkisi

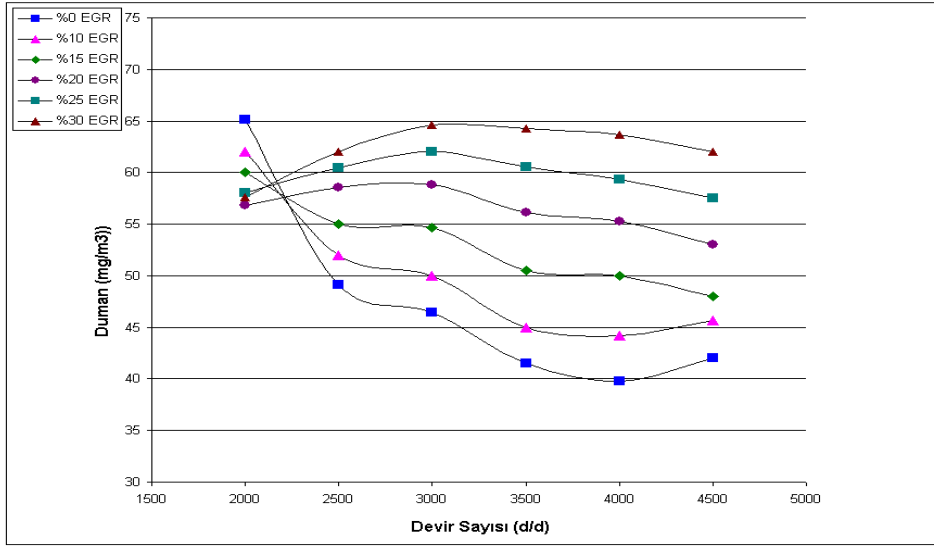
Soya yağı metil esteri karışımının yakıt olarak kullanılması, duman yoğunluğu üzerinde olumlu bir etki yaratmıştır. B20 yakıtı kullanımı ile duman yoğunluğunda (dizel yakıtına göre) ortalama % 14,33 azalma görülmüştür. Biyodizelin yapısında bulunan oksijen içeriği yanma karakteristiği açısından büyük avantajdır. Biyodizelin duman yoğunluğunun düşük olmasının nedeni motorine göre daha iyi yanma karakteristikleri göstermeleridir.

Dizel yakıtı ve soya yağı metil esteri ile yapılan testler sonucunda EGR' nin duman yoğunluğu üzerinde arttırıcı bir etkisi olduğu gözlenmiştir. Ancak EGR' nin bu etkisi dizel yakıtı kullanımında daha belirgindir. EGR soya yağı metil esteri ve karışımları kullanıldığı zaman duman yoğunluğunu daha az arttırmıştır. Yakıt içindeki soya yağı metil esteri oranı arttıkça bu etki daha da belirginleşmektedir.

Şekil 3.13 ve Çizelge 3.13' de görüldüğü üzere % 10 EGR için duman yoğunluğundaki ortalama azalış % 7,74 iken % 30 EGR durumunda bu oran % 39,87 olmaktadır.

Çizelge 3.13. B20 yakıtı için farklı EGR oranlarındaki duman yoğunluğu

Yük No	Devir Sayısı (d/d)	%0 EGR Duman (mg/m ³)	%10 EGR Duman (mg/m ³)	%15 EGR Duman (mg/m ³)	%20 EGR Duman (mg/m ³)	%25 EGR Duman (mg/m ³)	%30 EGR Duman (mg/m ³)
1	2000	65.12	62.00	60.00	56.80	58.00	57.60
2	2500	49.09	52.00	55.00	58.56	60.50	62.00
3	3000	46.45	50.00	54.66	58.80	62.00	64.60
4	3500	41.5	45.00	50.48	56.17	60.58	64.23
5	4000	39.78	44.20	50.00	55.25	59.36	63.68
6	4500	42.05	45.63	48.00	53.00	57.55	62.00



Şekil 3.13. B20 yakıtı için farklı EGR oranlarındaki duman yoğunluğu

EGR' nin CO emisyonları üzerindeki etkisi

% 20 soya yağı metil esteri + % 80 motorin karışımıyla elde edilen B20 yakıtının kullanılması, karbonmonoksit emisyonları üzerinde olumlu etki yaratmıştır. B20 yakıtı kullanımı ile karbonmonoksit emisyonlarında (motorine göre) ortalama % 6,85 oranında iyileşme görülmüştür.

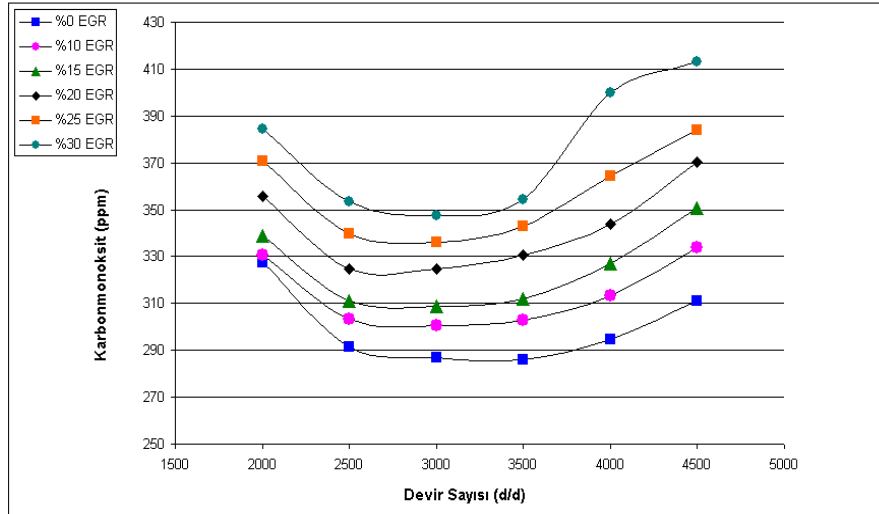
Karbonmonoksit emisyonlarındaki iyileşmenin temel sebebi soya yağı metil esterinin yapısında (dizel yakıtına göre) daha az karbon bulunması ve yapısında oksijen taşımasıdır. B20 yakıtının yapısında bulunan oksijen tam yük durumunda yakıtın zengin olduğu bölgelerde, oksijen/yakıt oranını artırarak yanmanın iyileşmesini sağlamaktadır. Böylece CO emisyonunu iyileştirmektedir.

EGR' nin soya yağı metil esteri kullanımı esnasındaki karbonmonoksit emisyonları üzerindeki etkisi motorin kullanımı ile benzerlik göstermektedir. Ancak EGR' nin soya yağı metil esteri ve karışımları kullanılması durumunda karbonmonoksit emisyonlarını arttırıcı etkisi daha az olmaktadır.

Şekil 3.14 ve Çizelge 3.14' de görüldüğü üzere % 10 EGR için CO emisyonlarındaki ortalama artış % 4,88 iken % 30 EGR durumunda bu oran % 25,38 olmaktadır.

Çizelge 3.14. B20 yakıtı için farklı EGR oranlarındaki CO emisyonu değerleri

Yük No	Devir Sayısı (d/d)	%0 EGR CO (ppm)	10% EGR CO (ppm)	%15 EGR CO (ppm)	%20 EGR CO (ppm)	%25 EGR CO (ppm)	%30 EGR CO (ppm)
1	2000	327.6	331	338.9022	355.9374	370.71216	384.27
2	2500	291.45	303	311.122875	324.6753	339.94728	353.59
3	3000	286.78	301	308.804704	324.749672	336.306906	347.38
4	3500	286	303	312.1976	330.5302	342.8568	354.55
5	4000	294.45	313	326.89839	343.652595	364.47021	400.01
6	4500	311.21	334	350.858154	370.215416	383.970898	413.04



Şekil 3.14. B20 yakıtı için farklı EGR oranlarındaki CO emisyonu

EGR' nin HC emisyonları üzerindeki etkisi

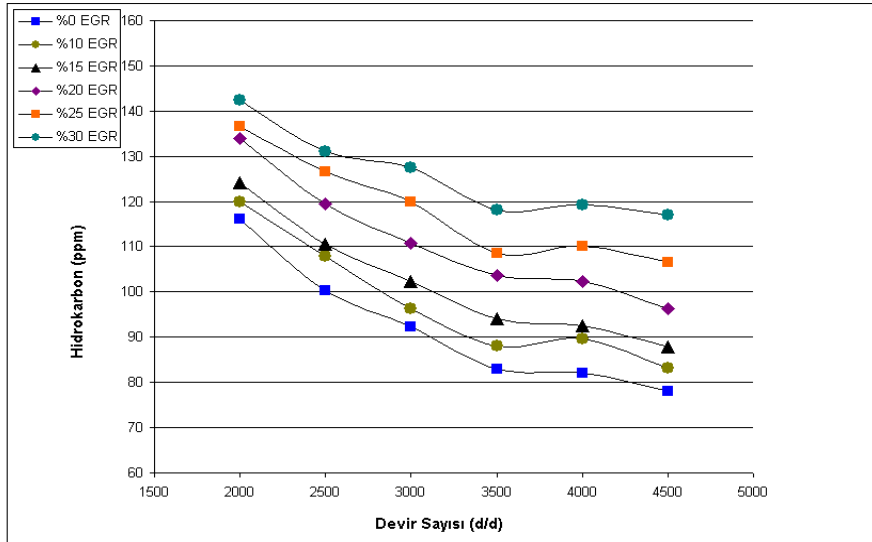
B20 yakıtının kullanılması, HC emisyonları üzerinde olumlu etki yaratmıştır. B20 yakıtı kullanımı ile HC emisyonlarında (motorine göre) ortalama % 8,65 oranında iyileşme görülmüştür. İyileşmenin nedeni CO emisyonlarında olduğu gibi SYME yapısında bulunan düşük karbon, yüksek oksijen konsantrasyonudur.

EGR' nin soya yağı metil esteri kullanımı esnasındaki hidrokarbon emisyonları üzerindeki etkisi motorin kullanımı ile benzerlik göstermektedir. Şekil 3.15 ve Çizelge

3.15' de görüldüğü üzere % 10 EGR için CO emisyonlarındaki ortalama artış % 6,12 iken % 30 EGR durumunda bu oran % 38,1 olmaktadır.

Yük No	Devir Sayısı (d/d)	%0 EGR HC (ppm)	10% EGR HC (ppm)	%15 EGR HC (ppm)	%20 EGR HC (ppm)	%25 EGR HC (ppm)	%30 EGR HC (ppm)
1	2000	116.12	120.00	124.201952	133.88636	136.53	142.44
2	2500	100.4	107.89	110.53036	119.40572	126.50	131.15
3	3000	92.3	96.38	102.40685	110.78769	120.02	127.38
4	3500	83.02	87.98	94.011848	103.65047	108.47	118.12
5	4000	82.16	89.69	92.610752	102.305632	110.06	119.26
6	4500	78.05	83.05	87.79064	96.34492	106.52	117.08

Çizelge 3.15. B20 yakıtı için farklı EGR oranlarındaki HC emisyonu değerleri



Şekil 3.15. B20 yakıtı için farklı EGR oranlarındaki HC emisyonu

EGR' nin NO_x emisyonları üzerindeki etkisi

% 20 soya yağı metil esteri + % 80 motorin karışımıyla elde edilen B20 yakıtının kullanılması, azotoksit emisyonları üzerinde olumsuz etki yaratmıştır. B20 yakıtı

kullanımı ile azotoksit emisyonlarında (dizel yakıtına göre) ortalama % 4,84 oranında artış görülmüştür.

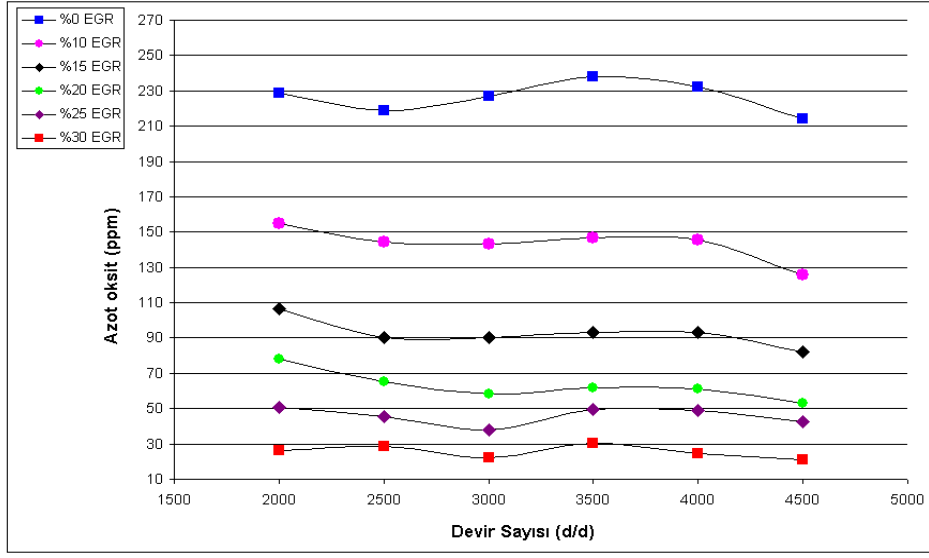
Azotoksit emisyonlarını etkileyen en önemli iki parametre yanma ortamında bulunan oksijen miktarı ve maksimum sıcaklıklara ulaşma ve kalma süresidir. NO_x artışıdaki en önemli neden biyodizelin içerdiği % 10 civarındaki oksijen ve oluşan biyodizel-hava karışımındaki HFK değerinin yüksek olmasıdır. Biodizel yakıtının oksijen içeriği ve oluşturduğu karışımın yüksek HFK değeri NO_x emisyon artışında etkili olmaktadır.

EGR' nin soya yağı metil esteri kullanımı esnasındaki azotoksit emisyonları üzerindeki etkisi motorin kullanımı ile benzerlik göstermektedir. Ancak EGR' nin soya yağı metil esteri ve karışımları kullanılması durumunda azotoksit emisyonlarını azaltıcı etkisi daha fazla olmaktadır.

Şekil 3.16 ve Çizelge 3.16' da görüldüğü üzere % 10 EGR için NO_x emisyonlarındaki ortalama azalma % 36,68 iken % 30 EGR durumunda bu oran % 88,75 olmaktadır.

Çizelge 3.16. B20 yakıtı için farklı EGR oranlarındaki NO_x emisyonu

Yük No	Devir Sayısı (d/d)	%0 EGR NO _x (ppm)	%10 EGR NO _x (ppm)	%15 EGR NO _x (ppm)	%20 EGR NO _x (ppm)	%25 EGR NO _x (ppm)	%30 EGR NO _x (ppm)
1	2000	228.56	155.11	106.43	78	50.456	26.56
2	2500	218.63	144.27	90.26	65	45.54	28.40
3	3000	227.15	143.14	90.14	58.06	38.025	22.26
4	3500	237.86	146.58	93	61.54	49.64	30.30
5	4000	232	145.67	93.31	61.17	48.75	24.74
6	4500	214.39	125.7	82.2	53	42.36	20.80



Şekil 3.16. B20 yakıtı için farklı EGR oranlarındaki NO_x emisyonu

3.3.3.2 B50 deneyleri

EGR' nin motor gücü üzerindeki etkisi

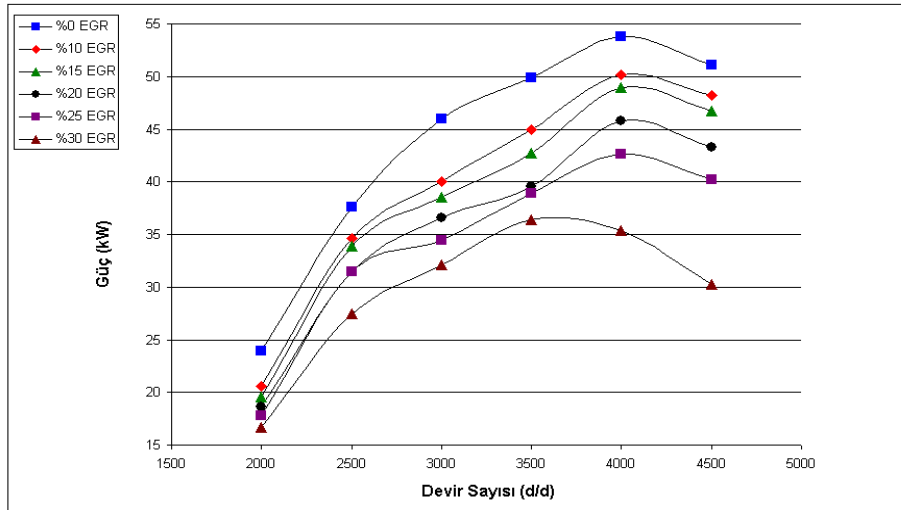
% 50 soya yağı metil esteri + % 50 motorin karışımıyla elde edilen B50 yakıtının (aynı deney düzeneği ve aynı şartlar altında) kullanılması motor gücü üzerinde olumsuz etki yaratmıştır. Motor gücünde (dizel yakıtına) ortalama % 3,58 oranında düşüş görülmüştür.

Çizelge 3.17' de artan devir sayısı ve EGR oranlarına göre motor gücü değerleri, Şekil 3.17' de ise B50 yakıtı için devir sayısına bağlı farklı EGR oranlarındaki motor gücü değişim grafiği görülmektedir.

Yapılan deneyler sonucunda % 10 EGR durumunda dizel yakıtı için güçteki ortalama düşüş % 9,51, EGR oranı % 30' a çıkarıldığında motor gücündeki kayıp % 31,57 olarak bulunmuştur.

Çizelge 3.17. B50 yakıtı için farklı EGR oranlarındaki motor gücü değerleri

Yük No	Devir Sayısı (d/d)	%0 EGR (kW)	%10 EGR (kW)	%15 EGR (kW)	%20 EGR (kW)	%25 EGR (kW)	%30 EGR (kW)
1	2000	23.92	20.58	19.56	18.60	17.80	16.66
2	2500	37.60	34.60	33.87	31.45	31.50	27.45
3	3000	45.95	40.03	38.56	36.60	34.45	32.15
4	3500	49.88	44.96	42.75	39.60	38.89	36.37
5	4000	53.82	50.12	48.96	45.78	42.63	35.40
6	4500	51.06	48.25	46.76	43.25	40.21	30.24



Şekil 3.17. B50 yakıtı için farklı EGR oranlarındaki motor gücü

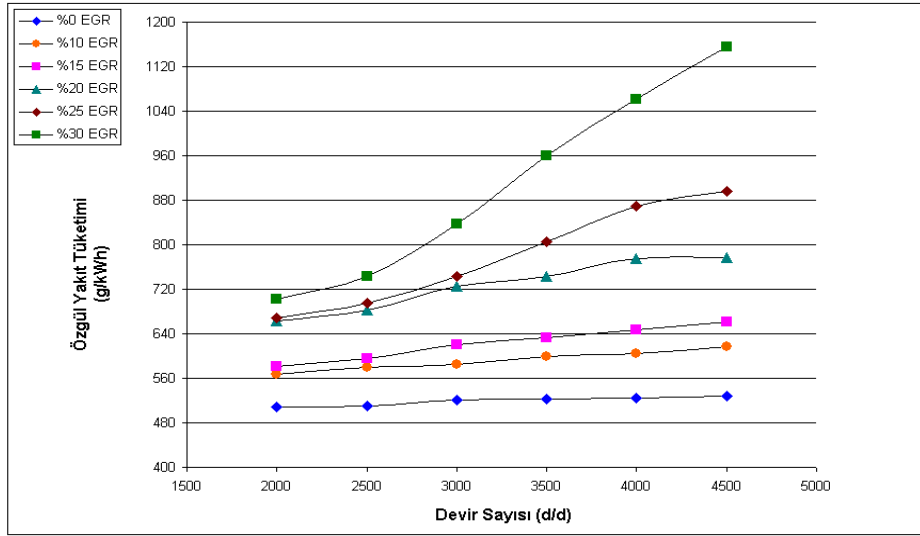
EGR' nin özgül yakıt tüketimi üzerindeki etkisi

Çizelge 3.18' de artan devir sayısı ve EGR oranlarına göre özgül yakıt tüketimi değerleri, Şekil 3.18' de ise B50 yakıtı için devir sayısına bağlı farklı EGR oranlarındaki özgül yakıt tüketimi değişim grafiği görülmektedir. B50 yakıtı kullanımı ile özgül yakıt tüketiminde (dizel yakıtına göre) ortalama % 7,25 oranında artış görülmüştür.

% 10 EGR durumunda dizel yakıtı için özgül yakıt tüketimindeki ortalama artış % 14,04, EGR oranı % 30' a çıkarıldığında ise % 74,88 olmaktadır.

Çizelge 3.18 B50 yakıtı için farklı EGR oranlarındaki özgül yakıt tüketimi

Devir Sayısı (d/d)	%0 EGR özgül yakıt tüketimi (g/kWh)	%10 EGR özgül yakıt tüketimi (g/kWh)	%15 EGR özgül yakıt tüketimi (g/kWh)	%20 EGR özgül yakıt tüketimi (g/kWh)	%25 EGR özgül yakıt tüketimi (g/kWh)	%30 EGR özgül yakıt tüketimi (g/kWh)
2000	509.25	566.96	581.98	662.24	668.33	703.00
2500	510.48	578.76	595.78	682.2	695.3	743.00
3000	520.46	585.69	619.9	726	743.12	837.00
3500	522.00	599.79	632.76	743.39	805.44	960.00
4000	523.92	604.87	647.78	775.08	869.38	1061.00
4500	528.71	616.64	661.87	776.61	896	1155.00



Şekil 3.18. B50 yakıtı için farklı EGR oranlarındaki özgül yakıt tüketimi

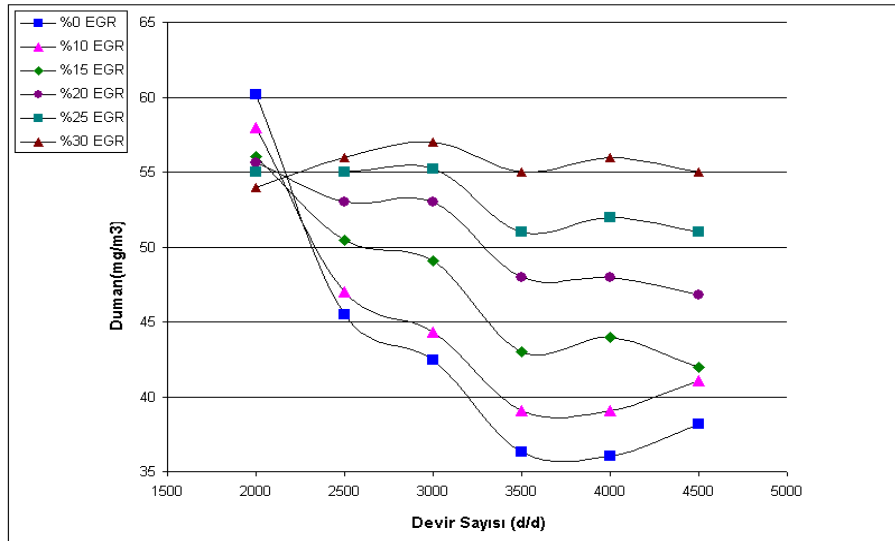
EGR' nin duman yoğunluğu üzerindeki etkisi

Çizelge 3.19' da artan devir sayısı ve EGR oranlarına göre duman yoğunluğu değerleri, Şekil 3.19' da ise B50 yakıtı için devir sayısına bağlı farklı EGR oranlarındaki duman yoğunluğu değişim grafiği görülmektedir. B50 yakıtı kullanımı ile duman yoğunluğunda (dizel yakıtına göre) ortalama % 2,14 oranında azalış görülmüştür.

% 10 EGR durumunda B50 yakıtı için duman yoğunluğundaki ortalama artış % 5,86, EGR oranı % 30' a çıkarıldığında ise % 36,5 olmaktadır.

Çizelge 3.19. B50 yakıtı için farklı EGR oranlarındaki duman yoğunluğu

Yük No	Devir Sayısı (d/d)	%0 EGR Duman (mg/m ³)	%10 EGR Duman (mg/m ³)	%15 EGR Duman (mg/m ³)	%20 EGR Duman (mg/m ³)	%25 EGR Duman (mg/m ³)	%30 EGR Duman (mg/m ³)
1	2000	60.19	57.99	56.02	55.60	55.00	54.00
2	2500	45.47	47.01	50.45	53.00	55.00	56.00
3	3000	42.43	44.28	49.10	53.00	55.20	57.00
4	3500	36.28	39.07	43.00	48.00	51.00	55.00
5	4000	36.03	39.05	44.00	48.00	52.00	56.00
6	4500	38.14	41.08	42.00	46.80	51.00	55.00



Şekil 3.19. B50 yakıtı için farklı EGR oranlarındaki duman yoğunluğu

EGR' nin CO emisyonları üzerindeki etkisi

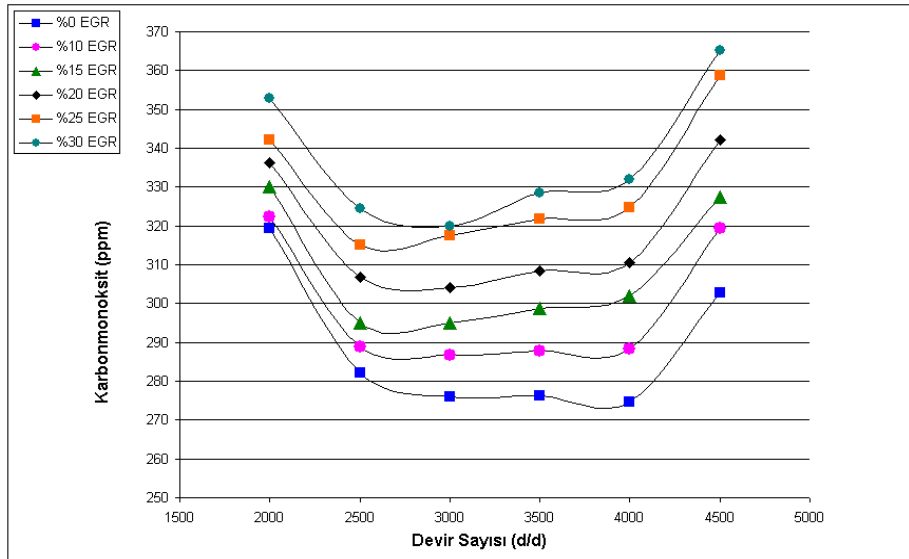
B50 yakıtının kullanılması ile karbonmonoksit emisyonlarında (dizel yakıtına göre) ortalama % 10,32 oranında iyileşme görülmüştür.

EGR oranı % 10 iken B50 yakıtının kullanılması ile CO emisyonlarında % 3,62 oranında artış görülmüştür. EGR oranı % 30' a çıkarıldığında CO emisyonlarındaki artışta % 16,94 olmuştur.

Çizelge 3.20' de artan devir sayısı ve EGR oranlarına göre karbonmonoksit emisyonları değerleri, Şekil 3.20' de ise B50 yakıtı için devir sayısına bağlı farklı EGR oranlarındaki karbonmonoksit emisyonları değişim grafiği görülmektedir.

Çizelge 3.20. B50 yakıtı için farklı EGR oranlarındaki CO emisyonları değerleri

Yük No	Devir Sayısı (d/d)	%0 EGR CO (ppm)	10% EGR CO (ppm)	%15 EGR CO (ppm)	%20 EGR CO (ppm)	%25 EGR CO (ppm)	%30 EGR CO (ppm)
1	2000	319.45	322	330	336.19	342.08	352.89
2	2500	282.15	289	295.12	306.85	315	324.45
3	3000	276.02	287	295	304.09	317.56	320.00
4	3500	276.35	288	298.7	308.37	321.8	328.50
5	4000	274.6	288	302.02	310.43	324.8	332.00
6	4500	302.9	319	327.52	342.15	358.7	365.09



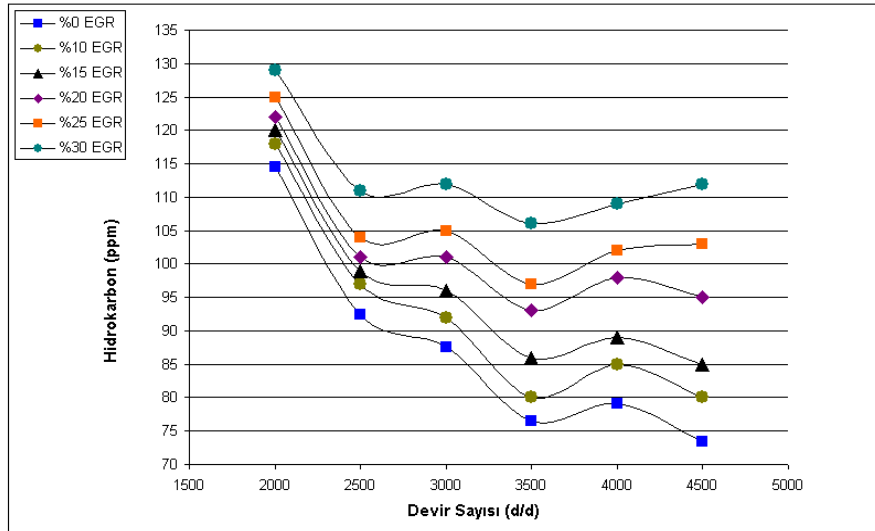
Şekil 3.20. B50 yakıtı için farklı EGR oranlarındaki CO emisyonları

EGR' nin HC emisyonları üzerindeki etkisi

B50 yakıtının kullanılması ile hidrokarbon emisyonlarında (dizel yakıtına e göre) ortalama % 13,44 oranında iyileşme görülmüştür. EGR oranı % 10 iken B50 yakıtının kullanılması ile HC emisyonlarında % 6,63 oranında artış görülmüştür. EGR oranı % 30' a çıkarıldığında HC emisyonlarındaki artışta % 38,12 olmuştur.

Çizelge 3.21. B50 yakıtı için farklı EGR oranlarındaki HC emisyonları değerleri

Yük No	Devir Sayısı (d/d)	%0 EGR HC (ppm)	10% EGR HC (ppm)	%15 EGR HC (ppm)	%20 EGR HC (ppm)	%25 EGR HC (ppm)	%30 EGR HC (ppm)
1	2000	114.56	118.00	120	122	125.00	129.00
2	2500	92.47	97.00	99	101	104.00	111.00
3	3000	87.56	92.00	96	101	105.00	112.00
4	3500	76.54	80.00	86	93	97.00	106.00
5	4000	79.13	85.00	89	98	102.00	109.00
6	4500	73.45	80.00	85	95	103.00	112.00



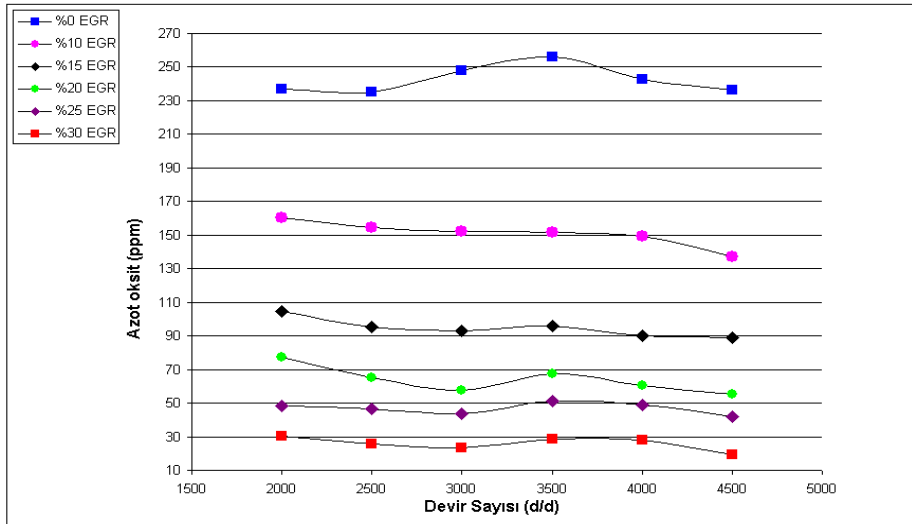
Şekil 3.21. B50 yakıtı için farklı EGR oranlarındaki HC emisyonları

EGR' nin NO_x emisyonları üzerindeki etkisi

Çizelge 3.22' de artan devir sayısı ve EGR oranlarına göre azotoksit emisyonu değerleri, Şekil 3.22' de ise B50 yakıtı için devir sayısına bağlı farklı EGR oranlarındaki azotoksit emisyonu değişim grafiği görülmektedir. B50 yakıtı kullanımı ile NO_x (dizel yakıtına göre) ortalama % 12,32 oranında artış görülmüştür. % 10 EGR durumunda B50 yakıtı için NO_x emisyonlarında ortalama artış % 37,79, EGR oranı % 30' a çıkarıldığında ise % 89,33 olmaktadır.

Çizelge 3.22. B50 yakıtı için farklı EGR oranlarındaki NO_x emisyonları değerleri

Yük No	Devir Sayısı (d/d)	%0 EGR NO _x (ppm)	%10 EGR NO _x (ppm)	%15 EGR NO _x (ppm)	%20 EGR NO _x (ppm)	%25 EGR NO _x (ppm)	%30 EGR NO _x (ppm)
1	2000	237.15	160.2	104.6	77.21	48.34	30.27
2	2500	235.06	154.45	95.36	65.42	46.73	25.86
3	3000	247.75	152.05	93	57.36	43.92	23.39
4	3500	256.18	151.8	95.75	67.6	51.22	28.42
5	4000	242.69	149.15	90	60.3	49.06	28.00
6	4500	236.6	137	89	55.41	42.07	19.32



Şekil 3.22. B50 yakıtı için farklı EGR oranlarındaki NO_x emisyonları

3.3.3.3 B100 deneyleri

EGR' nin motor gücü üzerindeki etkisi

B100 yakıtının kullanılması ile motor gücünde (dizel yakıtına göre) ortalama % 7,56 oranında kayıp görülmüştür.

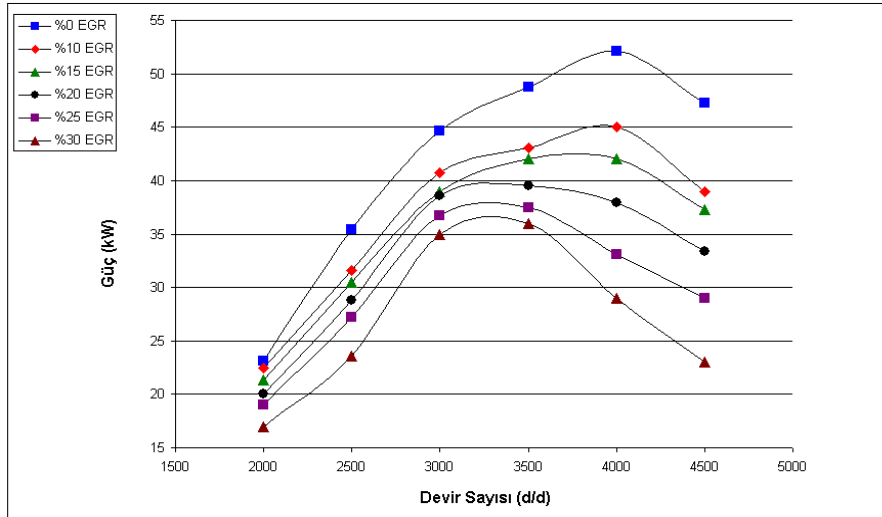
Çizelge 3.23' de artan devir sayısı ve EGR oranlarına göre motor gücü değerleri, Şekil 3.23' de ise devir sayısına bağlı farklı EGR oranlarındaki motor gücü değişim grafiği görülmektedir

EGR oranı % 10 iken B100 yakıtının kullanılması ile motor gücünde % 7,75 oranında azalma görülmüştür.

EGR oranı % 30' a çıkarıldığında ise motor gücündeki ortalama azalış % 33,87 olmuştur.

Çizelge 3.23. B100 yakıtı için farklı EGR oranlarındaki motor gücü değerleri

Yük No	Devir Sayısı (d/d)	%0 EGR (kW)	%10 EGR (kW)	%15 EGR (kW)	%20 EGR (kW)	%25 EGR (kW)	%30 EGR (kW)
1	2000	23.12	22.50	21.30	20.08	19.00	17.00
2	2500	35.40	31.60	30.50	28.80	27.20	23.60
3	3000	44.66	40.78	39.00	38.60	36.77	35.00
4	3500	48.75	43.10	42.00	39.50	37.50	36.00
5	4000	52.11	45.00	42.00	37.90	33.08	29.00
6	4500	47.26	39.00	37.25	33.36	29.00	23.00



Şekil 3.23. B100 yakıtı için farklı EGR oranlarındaki motor gücü

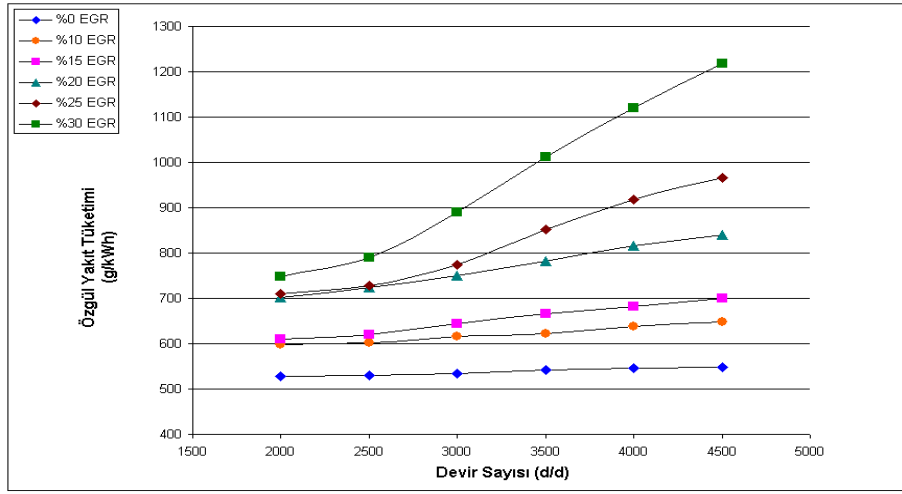
EGR' nin özgül yakıt tüketimi üzerindeki etkisi

B100 yakıtının kullanılması ile özgül yakıt tüketiminde (dizel yakıtına göre) ortalama % 11,09 oranında artış görülmüştür. Çizelge 3.24' de artan devir sayısı ve EGR oranlarına göre özgül yakıt tüketimi değerleri, Şekil 3.24' de ise devir sayısına bağlı farklı EGR oranlarındaki özgül yakıt tüketimi değişim grafiği görülmektedir

EGR oranı % 10 iken B100 yakıtının kullanılması ile özgül yakıt tüketiminde % 15,44 oranında artış görülmüştür. EGR oranı % 30' a çıkarıldığında ise bu değer % 78,73 olmuştur.

Çizelge 3.24. B100 yakıtı için farklı EGR oranlarındaki özgül yakıt tüketimi

Yük No	Devir Sayısı (d/d)	%0 EGR özgül yakıt tüketimi (g/kWh)	%10 EGR özgül yakıt tüketimi (g/kWh)	%15 EGR özgül yakıt tüketimi (g/kWh)	%20 EGR özgül yakıt tüketimi (g/kWh)	%25 EGR özgül yakıt tüketimi (g/kWh)	%30 EGR özgül yakıt tüketimi (g/kWh)
1	2000	527.40	598.15	609.8	702.5	710.3	748.50
2	2500	529.03	601.86	621	724.6	728.5	789.93
3	3000	534.65	615.7	643.56	750.14	774.9	890.70
4	3500	541.29	622.99	665.8	781.6	852.26	1012.81
5	4000	545.08	638.7	681.96	817	918.6	1120.86
6	4500	548.89	648.12	699.4	840.03	966.02	1217.60



Şekil 3.24. B100 yakıtı için farklı EGR oranlarındaki özgül yakıt tüketimi

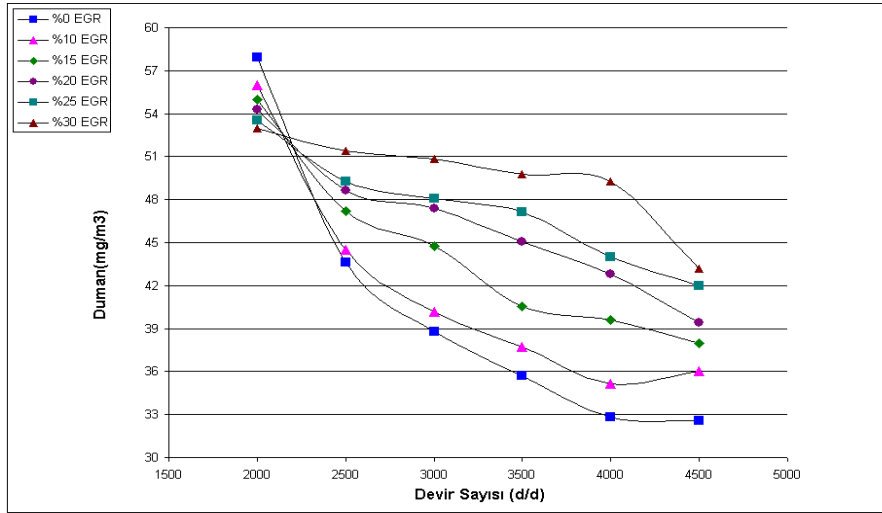
EGR' nin duman yoğunluğu üzerindeki etkisi

B100 yakıtının kullanılması ile duman yoğunluğunda (dizel yakıtına göre) ortalama % 27,5 oranında iyileşme görülmüştür. Çizelge 3.25' de artan devir sayısı ve EGR oranlarına göre duman yoğunluğu değerleri, Şekil 3.25' de ise devir sayısına bağlı farklı EGR oranlarındaki duman yoğunluğu değişim grafiği görülmektedir

EGR oranı % 10 iken B100 yakıtının kullanılması ile duman yoğunluğunda % 5,34 oranında artış görülmüştür. EGR oranı % 30' a çıkarıldığında ise bu değer % 29,94 olmuştur.

Çizelge 3.25. B100 yakıtı için farklı EGR oranlarındaki duman yoğunluğu

Yük No	Devir Sayısı (d/d)	%0 EGR Duman (mg/m ³)	%10 EGR Duman (mg/m ³)	%15 EGR Duman (mg/m ³)	%20 EGR Duman (mg/m ³)	%25 EGR Duman (mg/m ³)	%30 EGR Duman (mg/m ³)
1	2000	57.90	56.00	55.00	54.27	53.54	53.00
2	2500	43.60	44.50	47.20	48.64	49.26	51.43
3	3000	38.80	40.18	44.78	47.40	48.05	50.86
4	3500	35.70	37.70	40.57	45.08	47.16	49.80
5	4000	32.80	35.14	39.60	42.78	44.00	49.28
6	4500	32.60	36.00	38.00	39.40	42.00	43.17



Şekil 3.25. B100 yakıtı için farklı EGR oranlarındaki duman yoğunluğu

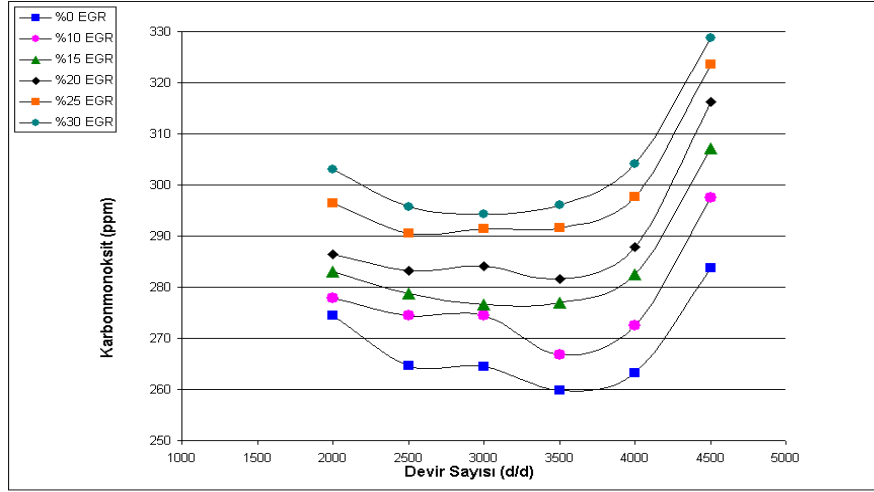
EGR' nin CO emisyonları üzerindeki etkisi

B100 yakıtının kullanılması ile CO emisyonlarında (dizel yakıtına göre) ortalama % 16,45 oranında iyileşme görülmüştür. Çizelge 3.26' da artan devir sayısı ve EGR oranlarına göre CO emisyonları değerleri, Şekil 3.26' da ise devir sayısına bağlı farklı EGR oranlarındaki CO emisyonları değişim grafiği görülmektedir

EGR oranı % 10 iken B100 yakıtının kullanılması ile CO emisyonlarında % 3,33 oranında artış görülmüştür. EGR oranı % 30' a çıkarıldığında ise bu değer % 13,14 olmuştur.

Çizelge 3.26. B100 yakıtı için farklı EGR oranlarındaki CO emisyonları

Yük No	Devir Sayısı (d/d)	%0 EGR CO (ppm)	10% EGR CO (ppm)	%15 EGR CO (ppm)	%20 EGR CO (ppm)	%25 EGR CO (ppm)	%30 EGR CO (ppm)
1	2000	274.40	277.91	283.10	286.47	296.52	303.05
2	2500	264.58	274.48	278.71	283.23	290.51	295.77
3	3000	264.48	274.40	276.67	284.05	291.43	294.21
4	3500	259.75	266.84	277.00	281.54	291.54	296.04
5	4000	263.19	272.53	282.46	287.82	297.64	304.04
6	4500	283.67	297.57	307.19	316.29	323.58	328.69



Şekil 3.26. B100 yakıtı için farklı EGR oranlarındaki CO emisyonları

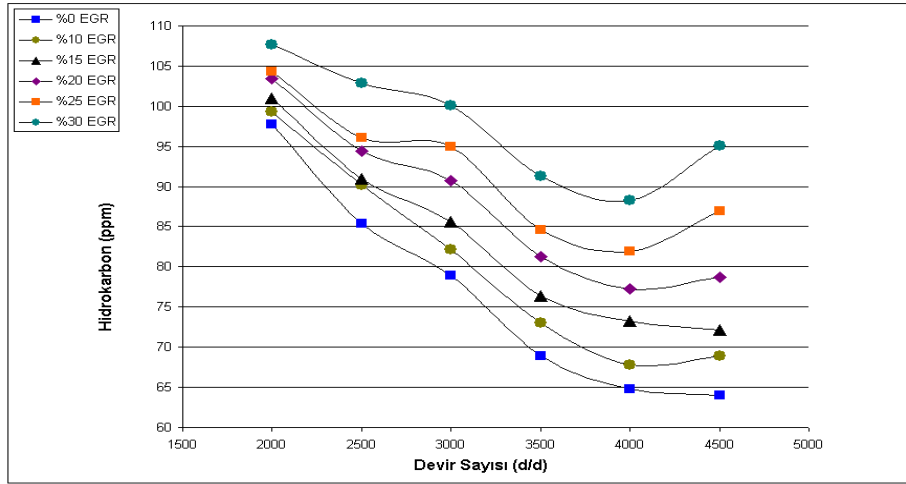
EGR' nin HC emisyonları üzerindeki etkisi

B100 yakıtının kullanılması ile HC emisyonlarında (dizel yakıtına göre) ortalama % 24,08 oranında iyileşme görülmüştür. Çizelge 3.27' de artan devir sayısı ve EGR oranlarına göre HC emisyonları değerleri, Şekil 3.27' de ise devir sayısına bağlı farklı EGR oranlarındaki HC emisyonları değişim grafiği görülmektedir

EGR oranı % 10 iken B100 yakıtının kullanılması ile CO emisyonlarında % 4,91 oranında artış görülmüştür. EGR oranı % 30' a çıkarıldığında ise bu değer % 29,15 olmuştur.

Çizelge 3.27. B100 yakıtı için farklı EGR oranlarındaki HC emisyonları

Yük No	Devir Sayısı (d/d)	%0 EGR HC (ppm)	10% EGR HC (ppm)	%15 EGR HC (ppm)	%20 EGR HC (ppm)	%25 EGR HC (ppm)	%30 EGR HC (ppm)
1	2000	97.70	99.28	100.96	103.48	104.33	107.69
2	2500	85.40	90.17	91.01	94.42	96.12	102.92
3	3000	78.98	82.15	85.57	90.70	94.98	100.12
4	3500	68.88	73.01	76.33	81.31	84.63	91.27
5	4000	64.76	67.78	73.30	77.25	81.97	88.28
6	4500	64.00	68.88	72.16	78.72	86.92	95.12



Şekil 3.27. B100 yakıtı için farklı EGR oranlarındaki HC emisyonları

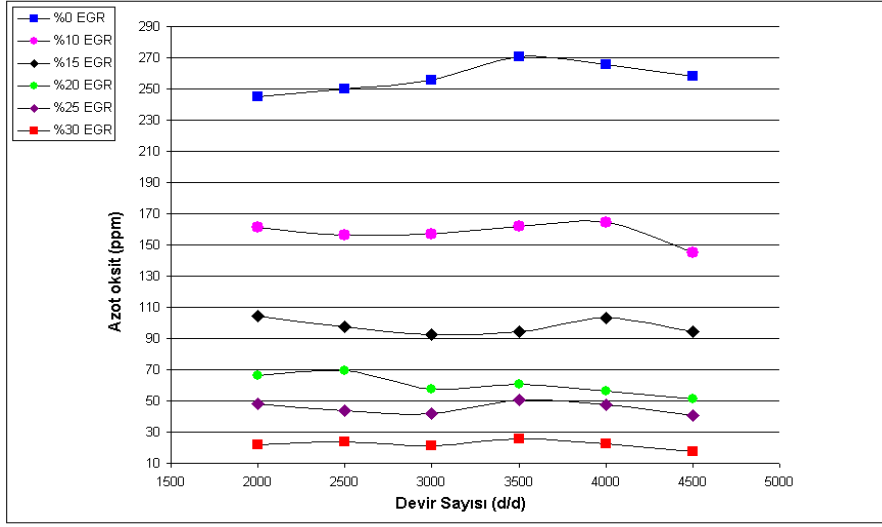
EGR' nin NO_x emisyonları üzerindeki etkisi

B100 yakıtının kullanılması ile NO_x emisyonlarında (dizel yakıtına e göre) ortalama % 19,21 oranında artış görülmüştür. Çizelge 3.28' de artan devir sayısı ve EGR oranlarına göre NO_x emisyonları değerleri, Şekil 3.28' de ise devir sayısına bağlı farklı EGR oranlarındaki NO_x emisyonları değişim grafiği görülmektedir

EGR oranı % 10 iken B100 yakıtının kullanılması ile NO_x emisyonlarında % 38,72 oranında artış görülmüştür. EGR oranı % 30' a çıkarıldığında ise bu değer % 91,45 olmuştur.

Çizelge 3.28. B100 yakıtı için farklı EGR oranlarındaki NO_x emisyonları

Yük No	Devir Sayısı (d/d)	%0 EGR NO _x (ppm)	%10 EGR NO _x (ppm)	%15 EGR NO _x (ppm)	%20 EGR NO _x (ppm)	%25 EGR NO _x (ppm)	%30 EGR NO _x (ppm)
1	2000	245.01	161.05	104.57	66.05	48.14	21.78
2	2500	250.26	156.47	97.47	69.14	43.45	23.96
3	3000	255.48	157.12	92.3	57.47	41.78	21.25
4	3500	270.68	162.05	94.35	60.53	50.46	25.47
5	4000	265.4	164.24	103	56.14	47.69	22.26
6	4500	258.36	145.15	94.4	51	40.35	17.25



Şekil 3.28. B100 yakıtı için bağlı farklı EGR oranlarındaki NO_x emisyonları

SONUÇ

Yapılan deneyler sonucunda hem motorin hem soya yağı karışımları kullanılması durumunda EGR' nin azotoksit emisyonları üzerinde büyük oranda azaltıcı etkisi olduğu tespit edilmiştir. EGR oranının artırılması ile EGR etkinliği de artmaktadır.

Bunun iki sebebi vardır; egzoz gazları geri dönüştürüldüğünde yanma odası içindeki asal gazların yüksek konsantrasyonuna bağlı olarak alev sıcaklığındaki düşme ve taze dolgu havası içindeki O₂ konsantrasyonundaki azalma ve buna bağlı olarak oksidasyon reaksiyonu için gerekli oksijenin olmayışıdır.

EGR oranının yükseltilmesi karbonmoksit ve hidrokarbon emisyonlarını kötüleştirir. Azalan taze dolgu havası miktarı nedeni ile karışım zenginleşmekte, yanmanın kötüleşmekte ve bunun sonucunda da CO ve duman yoğunluğu artan bir eğri karakteristiği göstermektedir. Özellikle uygulanan yüksek EGR oranlarında duman yoğunluğu artarak EGR uygulamaları için aşılması gereken bir sınır çizmektedir.

Her iki yakıt içinde (dizel ve biyodizel) EGR' nin azotoksit emisyonlarını ve motor gücünü azaltırken, özgül yakıt tüketimini, CO ve HC emisyonları ile duman yoğunluğunu arttırdığı tespit edilmiştir.

Biyodizel kullanımı ile CO ve HC emisyonları ile duman yoğunluğu iyileşirken, motor gücü, özgül yakıt tüketimi ve NO_x emisyonları kötüleşmiştir.

Soya yağı metil esteri ve karışımları dizel motorunda, herhangi bir değişiklik yapmadan sorunsuz bir şekilde kullanılabilir (dizel yakıtına yakın özellikte yağ seçilmelidir).

Karışım yakıtı içindeki biyodizel oranına bağlı olarak motor performansı ve emisyonlar üzerindeki etkisi de artmaktadır.

Dizel oksidasyon katalisti kullanımı dizel yakıtı için CO, HC ve NO_x emisyonlarında iyileşmeye neden olmuştur.

Yapılan deneyler sonucunda, EGR' nin CO ve HC emisyonları üzerindeki olumsuz etkisi, dizel oksidasyonlu katalist kullanılması ile giderilebilmektedir.

Hem dizel yakıtı hem soya yağı metil esteri karışımları kullanılması durumunda EGR' nin azotoksit emisyonları üzerinde büyük oranda azaltıcı etkisi olduğu görülmüştür. Ancak EGR soya yağı metil esteri üzerinde daha etkindir (dizelin yapısında aromatik bileşikler ve kükürt bulunması nedeniyle).

Yüksek EGR oranları ile birlikte dizel oksidasyonlu katalist kullanıldığında, NO_x emisyonları ortalama % 90 civarında azaltılabilmektedir. Testler sonucunda, EGR' nin CO ve HC emisyonları üzerindeki olumsuz etkisinin, oksidasyonlu katalist kullanılması ile giderilebildiği görülmüştür.

EGR' nin CO ve HC emisyonlarını kötüleştirme konvertör kullanılması ile göreceli olarak aşılabilmektedir. Ancak motor performansı ve yakıt tüketiminin kötüleşmesi engellenememektedir. Bu durum dikkate alındığında konvertör kullanılsa bile EGR oranının sürekli yükseltilmesi avantaj sağlamamaktadır. Tüm parametreler optimize edildiğinde EGR oranının % 15' den fazla arttırılmaması gerektiği ve ideal EGR oranının % 10 olduğu tespit edilmiştir.

Enjektör ve silindir içinde kurumlanma, yanma bozuklukları, katalizör tıkanması, yakıt ve egzoz sisteminde korozyon, yakıt filtresinde tıkanma gibi şikayetlerle EGR ve konvertör iptali sık başvurulmuş hatalı bir yoldur. Aslında tüm bu sorunlara neden olan EGR sisteminin kendisi değil, düşük kaliteli yakıt kullanımınıdır. Bu nedenle pek çok üretici firma düşük kaliteli yakıt kullanan ülkelere araçlarını EGR valfini kapatarak yollamaktadır. Yaygın kanının aksine EGR valf iptali motor gücünü arttırmamaktadır tersine ECU tarafından kontrol edildiği için iptali durumunda sürekli arıza sinyali göndererek motorun düzenli çalışmasını engellemektedir. Bu nedenden dolayı ve çevre sağlığı açısından EGR valfinin iptali kesinlikle önerilmemektedir.

KAYNAKLAR

- ŞAHİN, R., C. ERMAN. 2006.** Emissions Reduction Techniques for Non-road Diesel Engines. 3rd Automotive Tech. Congress, Bursa.
- JIAN L. J., Z. ZHAO., X. C. Duan. 2008.** Simultaneous Removal of NO_x and Diesel Soot Over Nanometer Ln-Na-Cu-O Perovskite-like Complex Oxide Catalyst. *Applied Catalysis B: Environmental* p.61–72.
- SARAÇOĞLU, S., O. BORAT., B. GÖNÜLATA. 1977.** Hava Kirlenmesi ve Kontrol Tekniği. Marmara Bölgesinde Çevre Kirlenmesi Semineri, İstanbul Ticaret Odası Seminerler Dizisi No:1, İstanbul.
- MARICQ, M. 2007.** Chemical Characterization of Particulate Emissions From Diesel Engines. *A review Aerosol Science* , p.1079–1118.
- SETTEN, V., B., A. L., MAKKEE., J. MOULIJN. 2001.** The Science and Technology of Catalytic Diesel Particulate Filters. *Catalysis Reviews*, p.489–564.
- ANONİM. 1982.** Air Quality Criteria for Nitrogen Oxides, U.S. Environmental Protection Agency Report No: EPA 600/8-82-06, U.S. Government Printing Office, Washington.
- WATANABE, S., K. KINOSHITA., N. HAYASHI., A. OHASHI., Y. UCHIDA., D. DYKES., G. TOUCHARD. 1997.** An Experiment to Purify Diesel Exhaust Gas Using an Electric Trap and Three Types of Catalysts. *Journal of Electrostatics*, p. 723-728.
- ANONİM. 2009.** AECC Response to EC for 2008 HDD NO_x Review.
- DESANTES, J. M., LOPEZ, J. J., GARCIA, J. M., HERNANDES, L. 2002.** Optimization of Exhaust Emissions in a H.D. Diesel Engine.
- LUNDQUIST, U., G. SMEDLER., P. STALHAMMAR. 2000.** Comparison Between Different EGR Systems for HD Diesel Engines and Their Effects on Performance Fuel Consumption and Emissions. SAE 2000-01-0226.
- HAŞİMOĞLU, C., İÇİNGÜR, Y., ÖĞÜT, H. 2002.** Dizel Motorlarında Egzoz Gazı Resirkülasyonunun Motor Performansına ve Egzoz Emisyonlarına Etkisinin Deneysel Analizi.
- USTA, N., CAN Ö., ÖZTÜRK E. 2006.** An Experimental Study on Performance and Exhaust of Diesel Engine Fuelled with Diesel Fuel International Combustion Symposium, Kırıkkale, Turkey, 89-103, 16-17 November.
- ALPĞIRAY. G., GÜRHAN, G. 2007.** Kanola Yağının Dizel Motorunun Performansına ve Emisyon Karakteristiklerine Etkilerinin Belirlenmesi. Ankara Üniv. Ziraat Fakültesi Tarım Bilimleri Dergisi, Ankara.

RAJAN, K., KUMAR, K.R. 2009. International Journal of Chemical Engineering Research Volume 1, Number 1 (2009), pp. 31–39.

ERGENEMAN, M., H. ARSLAN., M. MUTLU. 1998. Taşıt Egzozundan Kaynaklanan Kirleticiler. İstanbul.

KAYTAKOĞLU, S., F. VAR., S. ÖCAL. 1995. Motorlu Taşıtlardan Kaynaklanan Kirlilik ve Giderilme Yöntemleri. Yanma ve Hava Kirliliği Kontrolü 3. Ulusal Sempozyumu, ODTÜ, Çevre Mühendisliği Bölümü, Ankara.

SCHAFER, F., R. BASSHUYSEN. 1995. Reduced Emissions and Fuel Consumption in Automobile Engines. Springer-Verlag Press, Germany.

BORAT, O., M. BALCI., A. SÜRME. 1994. Hava Kirlenmesi ve Kontrol Tekniği. Teknik Eğitim Vakfı Yayınları-3, Ankara.

AILEN, J. 1990. Low NO_x Burner Systems. Combustion Systems.

ÖZTÜRK, A., A. KILIÇ. 1993. Çözümlü Problemlerle Termodinamik. Çağlayan kitabevi

HEYWOOD, J. B. 1998. Internal Combustion Engine Fundamentals. McGraw-Hill Publishing Company, p.586-592. NewYork.

TÜRK, C. 1998. Sabit Kaynaklardan Yayılan Azotoksitlerin Azaltılması ve Giderilmesi. *Lisans Tezi*, İTÜ Kimya-Metalurji Fakültesi, Kimya Müh. Bölümü.

MILLER, J., C. T. BOWMAN. 1989. Progress in Energy and Combustion Science, Vol.15, p.287-338.

VELZEN, D. 1991. Sulphur Dioxide and Nitrogen Oxides in industrial Waste Gases Emission, Legislation and Abatement. Kluwer Academic Publishers.

ANDREWS, G. 1995. NO_x Formation and Control The Eleventh Annual Short Course on Diesel Particulates and NO_x Emissions. University of Leeds, England.

İLKILIÇ, C., R. BEHÇET., S. AYDIN., H.AYDIN.2009. Dizel Motorlarında NO_x Oluşumu ve Kontrol Yöntemleri. 5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu (IATS'09), Karabük.

HEYWOOD, J. B. 1998. Internal Combustion Engine Fundamentals. McGraw-Hill Publishing Company, p.586-592. NewYork.

HERZOG, P.L., L. BURGLER., E. WINKLHOFER., P. ZELENKA., W. CARTELLIERI. 1992. NO_x Reduction Strategies for DI Diesel Engines. SAE Paper No: 920470.

THIEN, G.E. 1965. Development Work on Intake and Exhaust Ports of Four Stroke Diesel Engines. Osterreichische Ingenieur-Zeitschrift.

MIDDLEMISS, I.D. 1978. Characteristics of the Perkins Squish Lip Direct Injection Combustion System. SAE Paper No: 780113.

FANG, T. 2007. Broughton Hall Mechanical and Aerospace Engineering. North Carolina State University.

ANONIM. 2002. California Air Resources Board Staff Report

ANONIM. 2009. AECC Response to EC for 2008 HDD NO_x Review.

HEISLER, H., 1995. Advanced Engine Technology, Edward Arnold, London,

WIJETUNGE, R. S., C. BRACE., C. J. HAWLEY., N. D. VAUGHAN, 1999. Dynamic Behaviour of a High Speed Direct Injection Diesel Engine. SAE Paper, No: 1999-01-0829.

FILIPI, Z., Y. WANG., D.ASSANIS. 2001. Effect of Variable Geometry Turbine (VGT) on Diesel Engine and Vehicle System Transient Response. SAE Paper, No: 2001-01-1247.

LEET, J.A., A. MATHEAUS., D. DICKEY. 1998. EGR System Integration on a Pump Line-Nozzle Engine. SAE Paper, No:980181.

NIEUWSTADT, V., V. KOLMANOVSKY., P. E. MORAL. 2000. Coordinated EGR-VGT Control for Diesel Engines: An Experimental Comparison. SAE Paper, No: 2000-01-0266.

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Aylin Tok
Doğum Yeri ve Tarihi : 05.11.1980 İZMİR
Yabancı Dili : İngilizce, İtalyanca, Fransızca

Eğitim Durumu (Kurum ve Yıl)
Lise : Nuri Erbak Lisesi, 1997
Lisans : Uludağ Üniversitesi Makine Müh., 2005
Yüksek Lisans : Uludağ Üniversitesi Makine Müh., 2010

Çalıştığı Kurum/Kurumlar ve Yıl : Tofaş 2006-devam

İletişim (e-posta) : aylintok@gmail.com

Yayınları :