

Dizel Motorlarında Egzoz Gazları Resirkülasyonunun (EGR) Motor Performansı ve Egzoz Emisyonlarına Etkisinin Deneysel Analizi

Can HAŞİMOĞLU

*Selçuk Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi, Makine Eğitimi Bölümü,
Alaeddin Kampüsü, Selçuklu, Konya-TÜRKİYE*

Yakup İÇİNGÜR

*Gazi Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi, Makine Eğitimi Bölümü,
Teknikokullar, Ankara-TÜRKİYE*

Hüseyin ÖĞÜT

*Selçuk Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Tarım Makineleri Bölümü,
Alaeddin Kampüsü, Selçuklu, Konya-TÜRKİYE*

Geliş Tarihi 30.11.2000

Özet

İçten yanmalı motorlarda yanma odasındaki sıcaklık 1800 K'nin üzerine çıktığında, havanın içerisindeki azot ve oksijen kimyasal olarak birleşerek, insan sağlığına ve çevreye zararlı azot oksitlere dönüşür. Azot oksitler akciğerde, nemle birleşip nitrik asit oluşturarak, solunum hastalıklarına yol açmaktadırlar. Dizel motorlarının hava fazlalığı ile çalışması, azot oksit oluşturma potansiyellerini artırmaktadır. Bu çalışmada, dizel motorlarından kaynaklanan azot oksit emisyonlarının azaltılması üzerinde durulmuş, bu amaçla tek silindirli bir dizel motorunun egzoz gazları belirli oranlarda (% 10, 20, 30) motorun emme hattına geri gönderilerek motor performansı ve egzoz emisyonlarındaki değişim izlenmiştir. Yapılan deneyler sonucunda EGR uygulaması ile azot oksit emisyonlarında önemli ölçüde düşüş olurken, duman emisyonu ve özgül yakıt tüketiminin kötüleştiği görülmüştür.

Anahtar Sözcükler: Dizel motoru, Dizel emisyonu, EGR, Egzoz emisyon kontrolü

Experimental Analysis of the Effect of Exhaust Gas Recirculation (EGR) on Engine Performance and Exhaust Emissions on Diesel Engines

Abstract

When the temperature of the combustion chamber rises beyond 1800 K in internal combustion engines, the nitrogen and oxygen in the air combine chemically and become a gas called nitrogen oxide, which is harmful to human health and the environment. Nitrogen oxides combine with humidity in the lungs and become nitric acid, which causes breathing illnesses. Diesel engines use excess air for combustion, and this increases nitrogen oxide production potential. In this research, the reduction of nitrogen oxide emissions from diesel engines was investigated. For this purpose, a single cylinder diesel engine's exhaust gases were recirculated to the engine induction system at determined rates (10, 20, 30%) and changes in engine performance and exhaust emissions were traced. The results show that nitrogen oxide emissions decreased drastically but smoke emissions and specific fuel consumption deteriorated.

Key Words: Diesel engine, Diesel emission, EGR, Exhaust emission control

Giriş

Dünyadaki enerjinin ancak % 30 kadarı yanmasız bir şekilde hidrolik ve nükleer santrallerde üretilmektedir. Geriye kalan % 70 enerji fosil yakıt adı verilen kömür, petrol, gaz veya bunların sentetik türevlerinin yakılması ile elde edilmektedir (Ergeneman ve ark.,1998).

Hava kirlenmesinin başlıca kaynaklarını şu şekilde sıralanabilir;

1. Motorlu Taşıtlar,
2. Konut Isıtmaları,
3. Termik Santraller,
4. Endüstriden gelen gazlardır.

Şehirlerdeki kirlenmenin büyük bir bölümü otomobillerden kaynaklanmaktadır. Bu kirleticilerin özellikleri ve yoğunlukları motor tipine, motor ayarına, kullanım tarzına, yakıt bileşimine ve atmosferik şartlara bağlıdır (Çakıroğlu, 1996).

Motorlu taşıtlar çevreyi; egzoz emisyonu, yakıt-yağ buharı, kurşun bileşikler, asbest ve lastik tozları, aşınma, paslanma ve korozyon sonucu oluşan gaz, sıvı ve katı atıklarla kirlenmektedir. Bu kirleticilerin en etkin zararlı ve yoğun olanları egzoz gazında bulunan CO, HC, NO_x ve PM (is, duman vb.) emisyonlarıdır. Bunlardan NO_x ile PM emisyonları daha çok dizel motorlarından kaynaklanmaktadır (Işıksoluğu, 1997).

Toplu taşımacılıkta ve ağır yük taşıtlarında genellikle dizel motorları kullanılmaktadır. Bu sebeple dizel motorlarından kaynaklanan emisyonların azaltılması önem kazanmaktadır.

Bu çalışmada dizel motorlarından kaynaklanan NO_x emisyonlarının azaltılması üzerinde durulmuş, bu amaçla içten yanmalı motorlardan kaynaklanan NO_x emisyonlarını azaltmada kullanılan yöntemlerden biri olan egzoz gazları resirkülasyonu yöntemi tek silindirli bir dizel motoruna uygulanmıştır. Deney motorunun egzoz manifoldundan alınan gazlar belirli oranlarda motora geri gönderilerek motor performansı ve egzoz emisyonlarındaki değişim izlenmiştir.

Dizel motorlarından kaynaklanan egzoz emisyonları

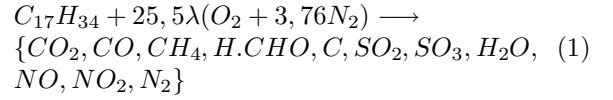
Kirleticilerin önemli olanlarını altı grupta toplayabiliriz. Bunlar ;

1. Karbon oksitler,

2. Azot oksitler,
3. Kükürtlü bileşenler,
4. Hidrokarbonlar,
5. Aldehitler,
6. Partiküller'dir (Borat ve ark., 1994).

Dizel motorlarında silindir içerisine emilen havanın birim hacmi piston yardımıyla 1/14 ile 1/22 değerine düşecek tarzda sıkıştırılmaktadır (Bilginpek, 1991). Benzin motoruna göre takriben iki misli sıkışan hava daha yüksek basınç ve sıcaklığa ulaşmaktadır. Bu sırada havanın içerisine püskürtülen yakıt kolaylıkla tutuşabilmektedir.

Teorik olarak 1kg yakıtta yaklaşık 15kg hava gerekmektedir. Dizel motorlarında iyi bir yanma için bu miktarın 1,5 ile 2 katı kadar hava ile yanmayı gerçekleştirmek gereklidir. Kirleticiler bileşenlerin meydana gelmesi yanma olayına bağlıdır. Burada gerçek hava/yakıt oranı teorik tam yanma miktarından büyük olmasına rağmen silindir içindeki yakıt damlacıkları çevresinde yeterli miktarda hava temin edilememektedir. Bu da eksik yanma ürünü olan is (karbon parçacıklarının) doğmasına yol açmaktadır. Motorin hava karışımlarının yanması ile oluşan ürünler aşağıdaki denklemde sunulmuştur.



Dizel motorlarında da işletme şartları sık sık değişmekte ve bazı hallerde hava/yakıt oranı istenen oranların dışına çıkmaktadır. Diğer bir ifade ile dizel motorunun hidrokarbon, NO_x, is, aldehit gibi kirleticiler bileşenleri artmaktadır. Yakıtın içerisindeki kükürt miktarı dizel egzozundan çıkan SO_x miktarını belirlemektedir. Çünkü kükürt bileşeni yanma olayında O₂ ile hemen reaksiyona girmektedir. Geri kalan O₂ diğer bileşenleri oksitleyebilmektedir (Balci, 1995).

Dizel motorlarından kaynaklanan zararlı emisyonların başında mutojenik ve kanserojenik etkiye sahip olan katı parçacıklar (partiküller) gelmektedir. Dizel motorları benzin motorları ile karşılaştırıldığında CO ve HC emisyonları daha az içermesine karşılık dizel araçlarda SO₂ (kükürtdioksit) ve NO_x emisyonları daha fazla oluşmaktadır (Anonymous, 1995).

Dizel motorlarında karakteristik olarak zararlı egzoz gazlarının seviyesi benzin motorlarına göre

daha düşüktür. Ayrıca zararlı gaz oranları motorun kullanım süresince fazlaca değişmezler. Bunun sebebi dizel motorunun çalışma prensibidir. Dizel motorları kendiliğinden ateşlemeli olup karışma silindirlerin içerisinde meydana gelir ve hava fazlalığı ile çalışır. Dizel motorlarının özelliği partikül atıklarının benzinli motorlara göre çok yüksek olmasıdır. Bu partikül emisyonlarının büyük bir kısmı karbon parçacıklarından, diğer kısmı ise hidrokarbonlardan oluşmaktadır (Anonymous, 1993).

Yanma esnasında is oluşumu, difzyon yanması sırasında başlar ve püskürtme süresinde is konsantrasyonu hızla artar. Püskürtme sonunda da maksimum düzeye ulaşır. Daha sonraki safhada is oksitlenmeye başlar. Ancak alev sıcaklığı düşmeye başladıkça oksitlenme yavaşlar ve 1400°C'nin altında etkisini kaybeder. Dolayısıyla is bu konsantrasyon seviyesinde dışarı atılır (İçingür ve ark., 1995).

NO_x'lerin çevre ve insan sağlığına etkisi

NO, NO₂, N₂O₂ ve benzeri bileşiklerin tümü NO_x olarak tanımlanmaktadır. Azot oksitler, kandaki hemoglobin ile birleşmektedir. Ciğerdeki nemle birleşerek nitrik asit oluştururlar. Oluşan asit miktarının konsantrasyonunun azlığı nedeniyle etkisi de az olmaktadır. Ancak zamanla birikerek solunum yolu hastalıkları bulunan kişiler için tehlike oluşturmaktadır (Ergeneman ve ark. 1998). Ayrıca NO_x'ler aerosol ve fotokimyasal duman oluşumu ile ozon tabakasının tahribine yol açmaktadırlar (Kaytaoğlu, 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.

NO₂, keskin kokulu kırmızı kahverengi karışımı bir gazdır. Düşük yoğunlukta olması halinde bile akciğeri tahriş eder, dokulara ve mukoza zarına zarar verir. MAK değeri 9 mg/m³' tür (Schafer, 1995).

Termal NO_x oluşum mekanizması

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 1800 K'nin üzerine çıktığında, havanın içerisindeki azot ve oksijen kimyasal olarak birleşerek, azot oksit denilen, insan

sağlığına ve çevreye zararlı bir gaz haline dönüşür. Stokiyometrik karışımın bir miktar fakir tarafında ($\lambda=1-1,1$) NO oluşumu maksimum iken, karışım zenginleşip fakirleştikçe NO miktarı da azalır (Heywood, 1988).

Yanma olaylarında oluşan Termal NO için Zel-dovich mekanizmasına göre O₂ ↔ 2O oluşunca zincir teşkil eden serbest radikallerde NO doğmaktadır;



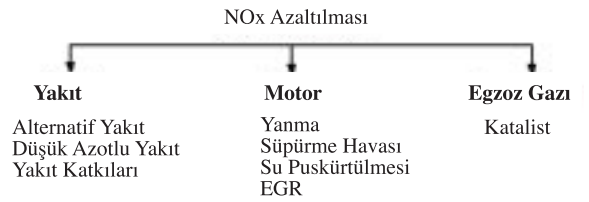
Bu arada alevin son yanma bölgesinde NO teşekkülü başlamadan önce esas yanma reaksiyonlarının dengeye ulaştığı kabul edilebilir. Yukarıdaki mekanizma HFK'nın 0,8'den büyük olan zenginlikte veya fakir karışımlar için geçerlidir. HFK ≤ 0,8 ise ilave olarak ;



reaksiyonu önem kazanmaktadır (Borat ve ark., 1994).

Dizel motorlarında NO_x kontrol yöntemleri

Dizel Motorlarında NO_x emisyonlarını kontrol etmede kullanılan çeşitli yöntemler Şekil 1'de gösterilmiştir. Başlıca yakıtta, motorda ve egzoz gazlarında alınacak önlemler olarak toplanabilir. Püskürtme avansının değiştirilmesi, fakir ya da zengin yanma, sıkıştırma oranının değiştirilmesi, emme supapı 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.



Şekil 1. NO_x Emisyonlarını Kontrol Etmede Kullanılan Çeşitli Yöntemler (Andrews, 1995).

Dizel motorlarında NO_x emisyonlarını azaltmada kullanılan yöntemlerin, etkileri Şekil 2'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 azalış sağlanabilmektedir.

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

Şekil 2. Dizel motorlarında NO_x emisyonlarını azaltmada kullanılan yöntemlerin etkileri (Andrews, 1995).

Deney Donanımı ve Yöntem

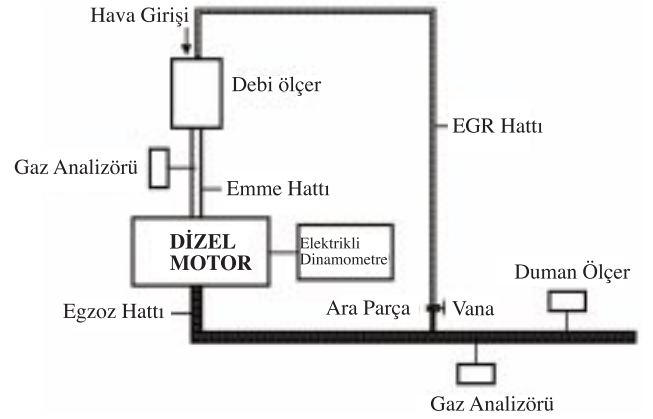
Deney donanımı

Deneyler Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Otomotiv Anabilim Dalı İçten Yanmalı Motorlar Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Motordan egzoz gazlarının alınabilmesi için bir ara parça yaptırılarak egzoz manifolduna bağlanmıştır. Ara parçaya bağlanan vana ve boru ile motordan alınan egzoz gazı debi ölçer üzerinden emme hattına geri verilmiştir. Deney düzenine şematik görünüşü Şekil 3'de, deneylerde kullanılan motora ait bilgiler Tablo 1'de verilmiştir.

Deneylerde devir sayısını ve döndürme momentini ölçen McClure marka elektrikli dinamometre kullanılmıştır. Dinamometrenin ölçüm kapasitesi 6500 devir/dakika ve 80 Nm'dir. Hassasiyeti ise 0,01

Nm'dir.

Deneyler sırasında kullanılan debi ölçer GO-Power M5000 tipindedir. Üzerinde 0-75 mm H₂O aralığında ölçme yapan bir manometresi bulunmaktadır. Deneylerde debi ölçer giriş ağzına 30 mm çaplı nozul takılmıştır. Motorun egzoz manifoldundan alınan egzoz gazı, debi ölçer ventürisi üzerinden emme hattına geri gönderilmiştir. Bu durumun debi ölçerdeki akışı bozacağı düşünüldüğünden deneyler sırasında tespit edilen hava tüketimi değerleri dikkate alınmamıştır. Bu sebeple EGR oranına bağlı olarak hacimsel verimin değişimi hesaplanmamıştır.



Şekil 3. Deney düzenine şematik görünüşü

Tablo 1. Deney Motorunun Teknik Özellikleri

Marka ve Model	P 8800 Hydra
Çalışma Prensibi	4 zamanlı direkt püskürtmeli
Silindir adedi	1
Silindir hacmi (l)	0,473
Silindir çapı (mm)	80,26
Kurs (mm)	88,9
Sıkıştırma oranı	19,8/1
Maksimum hız (devir/dakika)	4500
Maksimum güç (kW)	8
Maksimum moment (Nm)	25 (2500' devir/dakika'da)
Soğutma	Su ile soğutma
Yağlama	Tam basınçlı
Boşta Çalışma (devir/dakika)	1200
Püskürtme basıncı (bar)	275
Pompa tipi	Bosch DPA Mekanik regülatörlü

Tüketilen yakıt miktarını ölçebilmek için Ohaus marka 8 kg kapasiteli 0,1 gr hassasiyetli dijital terazi kullanılmıştır.

Deneyler sırasında üç adet emisyon ölçüm cihazı kullanılmıştır. Egzoz emisyonlarının ölçümünde Gaco-SN marka analiz cihazı kullanılmıştır. Cihaz CO, CO₂, NO_x, O₂, SO₂, gazlarını ppm ve mg/m³ olarak ölçebilmektedir. Cihaz NO_x emisyonunu ±1 ppm hassasiyetle, CO₂ emisyonunu ise ±0,01 hassasiyetle ölçmektedir. Ayrıca HFK ve yanma verimi de ölçülebilmektedir. Duman koyuluğunun ölçülmesinde OVL-2600 tipi dizel emisyon ölçüm cihazı kullanılmıştır. Cihaz duman miktarını K faktörü ve yüzde (%) olarak ölçebilmektedir. Cihazın hassasiyeti ±0,01'dir. Emme manifoldundaki CO₂ miktarını ölçebilmek için SUN SGA 9000 tipi emisyon ölçüm cihazı kullanılmıştır. Cihaz CO, CO₂, O₂, ve HC emisyonlarını ölçebilmektedir. CO₂ için hassasiyeti ±0,01'dir.

Çevre sıcaklığının belirlenmesi için Sınar marka 130°C kapasiteli, 1°C hassasiyetli termometre, çevre basıncının ölçülmesi için Precision marka 710-800 mmHg aralığında ölçüm yapabilen barometre kullanılmıştır.

Yakıt tüketiminin belirlenmesinde Robic Sports SC 700 model dijital göstergeli ve 0,01 saniye bölüntülü kronometre kullanılmıştır.

Yöntem

Deneylere başlamadan önce supap ayarı kontrol edilerek, enjektör püskürtme basıncı 275 bara ayarlanmıştır. Enjeksiyon pompa ayarları referans değerlerinde kabul edilmiştir. Motor çalıştırılmadan önce su ve yağ devir daim pompaları ve ısıtıcıları termostatlar açılana kadar çalıştırılmıştır. Deneylere başlamadan önce motor orta devirlerde hafif yüklerde çalıştırılıp rejime girmesi sağlanmıştır. Deneyler motor tam yük konumunda iken yapılmıştır. Deneyler sırasında püskürtme avansı 18°'de sabit tutulmuştur. Yakıt olarak ise 46 setan sayılı Türk Petrol motorin kullanılmıştır.

Deneyler % 10, 20 ve 30 EGR'li ve EGR'siz olarak iki aşamada gerçekleştirilmiştir. EGR'siz deneyler önce yapılarak egzozda ölçülen CO₂ miktarından yararlanılarak EGR'li deneyler için emme manifoldunda olması gereken CO₂ miktarı hesaplanmıştır. Daha sonra egzoz manifoldundaki ara parçaya bağlı vana açılarak debi ölçer üzerinden motorun emme hattına egzoz gazı gönderilmiştir. Emme hattı üzerine bir emisyon ölçüm cihazı

bağlanarak bu kısımdaki CO₂ miktarı vana ile kontrol altında tutulmuştur.

Egzoz emisyonlarının ölçülmesinde Gaco-Sn marka gaz analizörü kullanılmıştır. Cihazın probu ölçüm yerine bağlandıktan sonra 60 saniye beklenip değerler kaydedilmiştir. Duman ölçümü içinde aynı yol izlenmiştir.

Emme hattındaki CO₂ miktarının belirlenmesi için emme hattına açılan bir deliğe cihazın probu sızdırmaz bir şekilde bağlanmıştır.

Dijital terazi ile 1 dakikadaki yakıt tüketimi gram olarak ölçülmüştür.

Motora geri gönderilen egzoz gazı miktarının belirlenmesinde 5 nolu denklem kullanılmıştır (Needham ve ark., 1993).

$$EGR(\%) = \frac{[(CO_2)_{emme\ manifoldu} - (CO_2)_{çevre}]}{[(CO_2)_{egzoz\ manifoldu}]} * 100 \quad (5)$$

Havanın içerisinde hacimsel olarak % 0,03 CO₂ bulunmaktadır (Çetinkaya, 1999). Bu değer çok küçük olduğu için cihazın hassasiyeti ortamdaki karbondioksit miktarını ölçmeye yetmemiştir. Dolayısıyla ortamdaki CO₂ yüzdesi sıfır olarak kabul edilmiştir.

Elde edilen verilere göre yapılan hesaplamalar

Motordan ölçüm yoluyla elde edilen verilerle güç, ortalama efektif basınç, saatlik yakıt tüketimi ve özgül yakıt tüketimi değerleri hesaplanmıştır.

Dizeller için düzeltme katsayısı bulunarak moment değerleri bu katsayı ile çarpılarak düzeltilmiştir.

Dizeller için düzeltme katsayısı ;

$$K_d = [(P_{sd}/P_a)^{0,65}] * [(T_a/T_{sd})]^{0,5} \quad (6)$$

Eşitliği ile hesaplanmıştır.

Buradan ;

$$Me_d = Me * K_d \quad (7)$$

Nm olarak bulunur.

Güç, düzeltilmiş moment değerinden;

$$Pe = (Me_d * n)/9549 \quad (8)$$

kW olarak bulunur.

Dakikadaki yakıt tüketimi;

$$B = (3600 * m_y)/60 \quad (9)$$

Yukarıdaki eşitlik kullanılarak saatlik yakıt tüketimine çevrilmiştir.

Özgül yakıt tüketimi ;

$$be = (B * 10^3) / Pe \quad (10)$$

ifadesi ile (g/kWh) olarak bulunmuştur

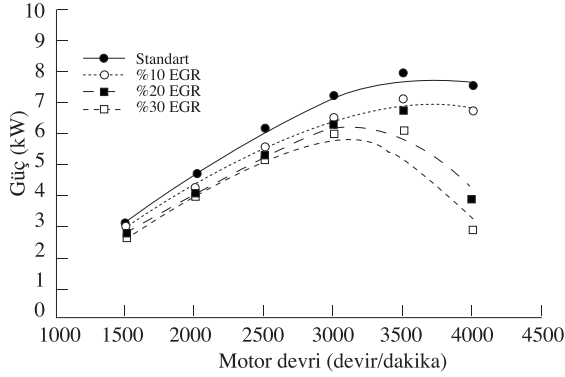
Ortalama efektif basınç;

$$Pme = (12,56 * Me) * Vd (kPa) \quad (11)$$

ile hesaplanmıştır (İçingür, 1996).

Araştırma Sonuçları ve Tartışma

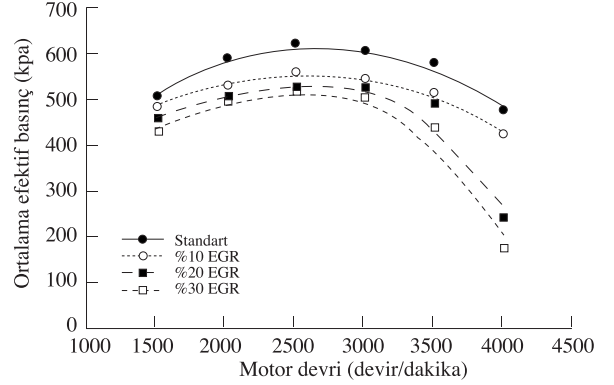
Gerçekleştirilen motor deneyleri sonucunda tam yük durumunda EGR oranına bağlı olarak, güç, özgül yakıt tüketimi, ortalama efektif basınç, azot oksit, ve duman emisyonları motor devrine bağlı olarak Şekil 4...8,'de grafiklerle verilmiştir. Ölçümler 1500, 2000, 2500, 3000, 3500 ve 4000 devir/dakika'da yapılmıştır.



Şekil 4. Motor devir sayısına bağlı olarak farklı EGR oranlarında motor gücü değişimleri

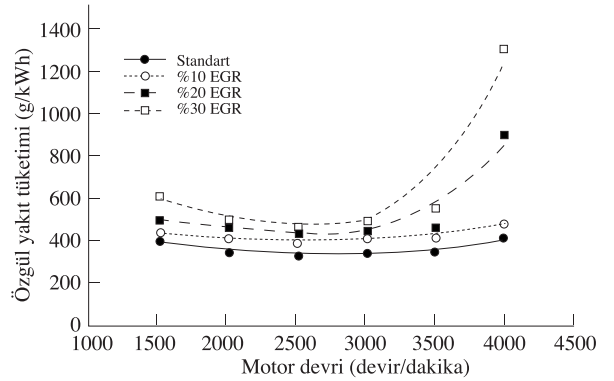
Motor devir sayısına bağlı olarak her bir EGR oranı için motor gücündeki değişim Şekil 4'de, motor devrine bağlı olarak her bir EGR oranı için Ortalama Efektif Basınçtaki değişim Şekil 5'te görülmektedir. Standart ve % 10 EGR durumunda maksimum güç 3500 devir/dakika'da elde edilirken, % 20 ve % 30 EGR'de maksimum gücün elde edildiği devir 3000 devir/dakika'ya düşmüştür. Her devir aralığında Standart EGR ile % 10 EGR arasında ortalama efektif basınç yaklaşık % 10 düşmüştür. 3500 devir/dakika'ya kadar ise EGR oranı arttırıldıkça her devir için ortalama efektif basınç yaklaşık % 5 azalmaktadır. 3500 devir/dakika'dan sonra ise ortalama efektif basınçtaki azalış artmaktadır. Ayrıca 4000 devir/dakika'da % 20 ve % 30 EGR oranlarında motor gücü ve ortalama efektif basınçta, sırasıyla

yaklaşık % 50 ve % 60 düşüş gözlenmiştir. 3500 devir/dakika'nın altında ise motor gücünde ve ortalama efektif basınçta yüksek devirlere göre önemli bir düşüş olmamıştır.



Şekil 5. Motor devir sayısına bağlı olarak farklı EGR oranlarında ortalama efektif basınç değişimleri

Şekil 6'da motor devrine bağlı olarak her bir EGR oranı için özgül yakıt tüketimi görülmektedir. Her devir aralığında standart değerler ile % 10 EGR'li değerler arasında ortalama % 15'lik bir artış vardır. % 20 ve % 30 EGR durumunda da 3000 devir/dakika'ya kadar bu fark hemen hemen değişmez. Fakat 4000 devir/dakika'da % 20 ve % 30 EGR durumunda özgül yakıt tüketimi sırasıyla 2 ve 3 kat artmaktadır.



Şekil 6. Motor devir sayısına bağlı olarak farklı EGR oranlarında özgül yakıt tüketimi değişimleri

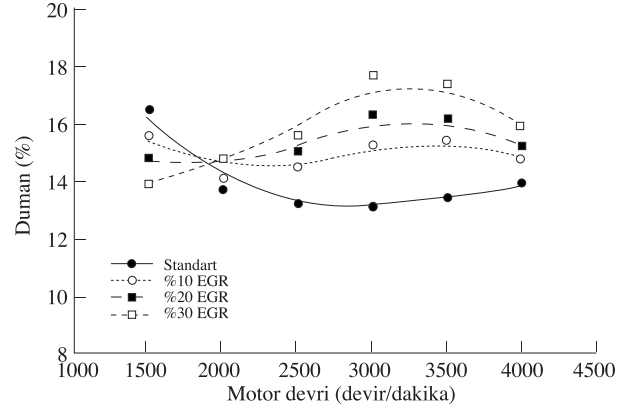
Artan EGR oranı ile beraber motor gücünün, OEB ve ÖYT'nin kötüleşmesinde aynı faktörler etkili olmaktadır. Yüksek devirlerde artan EGR oranına bağlı olarak karışımın çok fakirleşmesi yanmanın kötüleşmesine yol açmaktadır. Ayrıca artan EGR oranı ile birlikte açığa çıkan maksimum ısı miktarının azalması ve maksimum ısının açığa çıktığı noktanın gecikmesine sebep olmaktadır. Silindire

gönderilen egzoz gazları, karışımı seyreltip yanma hızını yavaşlatmakta böylece maksimum ısının açığa çıktığı nokta gecikmektedir. Açığa çıkan ısının bir kısmı egzoz gazları tarafından soğurulduğundan yanma sonunda açığa çıkan maksimum ısı miktarı da azalmaktadır. Yanma hızının yavaşlaması ve dolgu içerisindeki oksijen miktarının azalması da motor gücü, OEB ve ÖYT'de kötüleşmeye sebep olmaktadır.

Deneyler sabit püskürtme avansında yapıldığından yüksek devirlerde avans yetersiz kalmakta, dolayısıyla bir miktar yakıt yanamamaktadır. Bunun sonucu olarak özellikle 3000 devir/dakika'dan sonra özgül yakıt tüketimi önemli ölçüde artmaktadır.

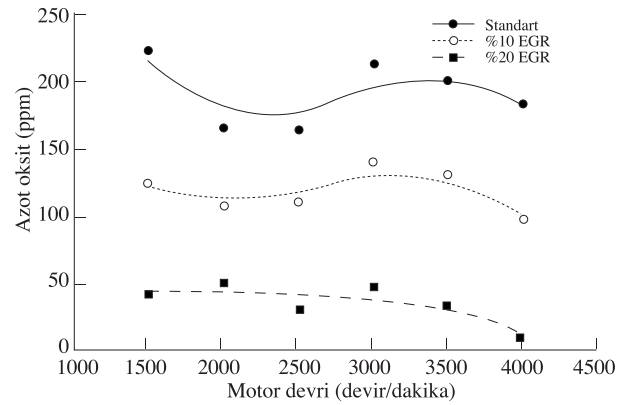
Şekil 7'de motor devrine bağlı olarak her bir EGR oranı için duman yoğunluğu değerleri görülmektedir. 1500 devir/dakika'da duman yoğunluğu EGR oranı ile ters orantılıdır. Yani düşük devirlerde EGR oranı arttırıldıkça duman yoğunluğu azalmakta ya da pek değişmemektedir. Standart, % 10, % 20 ve % 30 EGR oranları arasında duman yoğunluğu ortalama yaklaşık % 5'er azalmıştır. 2000 devir/dakika için ise her bir EGR oranı için duman yoğunluğu pek değişmemiştir. 2500 devir/dakika için % 10, % 20 ve % 30 EGR'li değerler birbirine yakın olmakla birlikte standart değerde ortalama yaklaşık % 10 daha fazladır. 3000 ve 3500 devir/dakika için % 10, % 20 ve % 30 EGR'li değerler arasında yaklaşık % 5, standart değer ile % 10 EGR'li değer arasında ise yaklaşık % 10'luk bir değişim görülmektedir. 4000 devir/dakika'da ise % 10, %20 ve % 30 EGR'li değerler fazla değişmemekle birlikte % 10 EGR'i değer ile standart değer arasında yaklaşık % 5'lik bir fark vardır.

1500 ve 2000 devir/dakika için EGR oranı arttırıldıkça duman yoğunluğunun azalması ya da değişmemesinin sebebi ise deneylerin sabit püskürtme avansında yapılması sonucu, düşük devirlerde avansın fazla gelmesi yüzünden olduğu sanılmaktadır. Yüksek devirlere çıkıldığında ise artan EGR oranıyla beraber duman yoğunluğu da artmaktadır. Yüksek devirlerde avansın yetersiz kalması yüzünden yanmanın tamamlanamaması, ayrıca silindir içindeki oksijen miktarının azalması ve EGR'nin alev sıcaklığını düşürmesi sonucu yakıtın oksidasyonunun tamamlanamaması sebebiyle duman yoğunluğu artmaktadır.



Şekil 7. Motor devri sayısına bağlı olarak farklı EGR oranlarında duman yoğunluğu değişimleri

Şekil 8'de motor devrine bağlı olarak her bir EGR oranı için azot oksit emisyonları ppm olarak görülmektedir. Standart değerler ile % 10 ve % 20 EGR uygulandığı durumdaki değerler arasında, sırasıyla yaklaşık olarak ortalama % 35 ve % 75'lik bir azalma olmuştur. % 30 EGR durumunda ise emisyon ölçüm cihazında azot oksit emisyonları sıfır olarak ölçülmüştür. Egzoz gazları yanma sonucu açığa çıkan ısının bir kısmını absorbe ettiklerinden dolayı yanma odasındaki maksimum sıcaklık düşmekte dolayısıyla azotoksit emisyonları da azalmaktadır. Ayrıca yanma hızının düşmesi maksimum ısının açığa çıktığı noktayı geciktirdiğinden maksimum silindir sıcaklığı azalmakta ve buna bağlı olarak azotoksit emisyonları düşmektedir. Yüksek EGR oranlarında yanma hızının çok düşmesi ve yüksek devirlerde avansın yetmemesi sonucu yanma şartlarının kötüleşmesi azotoksit emisyonlarını düşürmektedir.



Şekil 8. Motor devri sayısına bağlı olarak farklı EGR oranlarında azot oksit emisyonu değişimleri

Sonuç ve Öneriler

Yapılan deneyler sonucunda EGR uygulaması ile NO_x emisyonları dışında kalan diğer parametrelerde kötüleşme olduğu görülmüştür. Tam yük koşullarında, EGR oranının % 30'dan daha fazla artırılması, motorun performansını daha çok kötüleştireceği için tavsiye edilmemektedir. Hem NO_x emisyonları, hem de diğer parametreler dikkate alındığında ideal EGR oranı % 10 olarak bulunmuştur. Tam yük koşullarında performans kayıplarının önlenmesi için EGR devre dışı bırakılabilir ve başka yöntemler uygulanabilir.

EGR ile karışımın yanma hızı düşmektedir. Bu durumda silindire püskürtülen yakıtın bir kısmı gereken süre içerisinde yanamayacağından yakıt tüketimi kötüleşmektedir. Kullanılan yakıtın setan sayısı artırılarak karışımın daha erken tutuşması sağlanabilir. Dolayısıyla karışımın yanabilmesi için daha fazla süre sağlanmış olur.

Egzoz gazlarının içerisindeki küçük partiküller motordaki aşınmayı arttıracaktır. Bunun için gazlar silindire geri gönderilmeden önce bir filtreden geçirilmelidir. Partiküllerin filtrelenmesi ile EGR'nin aşındırma etkisi de azaltılabilir. Ayrıca EGR sistemi bulunan motorlarda daha yüksek kaliteli motor yağlarının kullanılması da aşınmayı azaltacaktır.

Silindirlere geri gönderilen egzoz gazları emme manifolduna verilmeden önce bir soğutucudan geçirilerek soğutulduğu takdirde, hem sıcak egzoz gazları yüzünden motorun volumetrik veriminin olumsuz etkilenmesi bir miktar önenecek hem de soğumuş egzoz gazlarının yoğunluğunun artması

dolayısıyla silindire geri gönderilen egzoz gazı miktarı artacaktır.

Semboller

be	=	özgül yakıt tüketimi (g/kWh)
B	=	saatlik yakıt tüketimi (g/h)
$C_{17}H_{34}$	=	motorin
EGR	=	egzoz gazları resirkülasyonu
HC	=	hidro karbon
H.CHO	=	aldehit
HFK	=	hava fazlalık katsayısı
K_d	=	düzeltilme katsayısı
MAK	=	maksimum atmosfer konsantrasyonu
Me	=	motor momenti (Nm)
Me_d	=	düzeltilmiş motor momenti (Nm)
m_y	=	dakikadaki yakıt tüketimi
n	=	motor devri (devir/dakika)
NO_x	=	azot oksit
N_2O_2	=	diazot dioksit
OEB	=	ortalama efektif basınç (kPa)
OH	=	hidroksit
ÖYT	=	özgül yakıt tüketimi (gr/kWh)
P_e	=	motor gücü (kW)
P_a	=	ortam basıncı (kPa)
P_{sd}	=	standart basınç (293 K)
PM	=	partikül madde
ppm	=	milyonda bir partikül
SO_x	=	kükürt oksit
T_a	=	ortam sıcaklığı (K)
T_{sd}	=	standart sıcaklık (293 K)
V_d	=	toplam motor hacmi (l)
λ	=	hava fazlalık katsayısı

Kaynaklar

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

Anonymous, Bosch Teknik Bülten, Ankara, 26-27, 1993.

Anonymous, "Motorlu Taşıtlardan Kaynaklanan Hava Kirliliğinin Önlenmesi Paneli", Ankara, 72, 1995.

Balcı, M., "Motorlu Taşıtlarda Kirletici Denetimi", 4. Yanma Sempozyumu, Bursa, 437-447, 1995.

Bilginpek, H., Dizel Motorları, MEB Basımevi, İstanbul, 30, 1991.

Borat, O., Balcı, M., ve Sürmen, A., Hava Kirlenmesi ve Kontrol Tekniği, Teknik Eğitim Vakfı Yayınları-3, Ankara, 25, 1994.

Çakıroğlu, M., "Motorlu Taşıt Trafikinde Egzoz Emisyonları", 1. Ulusal Ulaşım Sempozyumu, İstanbul, 565-573, 1996.

Çetinkaya, S., Termodinamik, Nobel Yayınları, Ankara, 259, 1999.

Ergeneman, M., Arslan, H., ve Mutlu, M., Taşıt Egzozundan Kaynaklanan Kirleticiler, Kutlar, O.A. (editör), Birsen Yayınevi, İstanbul, 4-8, 1998.

Heywood, J.B., Internal Combustion Engine Fundamentals, McGraw-Hill Publishing Company, New York, 586-592, 1988.

İşıksoluğu, M. A., "Dizel Motorlu Taşıtların Egzoz Gazındaki Duman Koyuluğu ve Ölçümde Karşılaşılan Sorunlar", Mühendis ve Makine Dergisi, 38, 453, 22-25, 1997.

İçingür, Y., Çelikten, İ., Salman, M.S., ve Koca, A., “Dizel Motorlarında Servis Koşullarından Kaynaklanan Emisyonların Deneysel Olarak İncelenmesi”, Yanma ve Hava Kirliliği Kontrolü III. Ulusal Sempozyumu, Ankara, 156-167, 1995.

İçingür, Y., “Dizel Motorlarının Aşırı Doldurulmasında Kullanılan Bir Basınç Dalga Makinesinin Tasarımı ve Kullanılabilirliğinin Deneysel Analizi”, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Doktora Tezi, Ankara, 84, 1996.

Kaytakoğlu, S., Var, F., ve Öcal, S. E., “Motorlu Taşıtlardan Kaynaklanan Kirlilik ve Giderilme Yöntemleri”, Yanma ve Hava Kirliliği Kontrolü 3. Ulusal Sempozyumu, Ankara, 143-155, 1995.

Needham, J.R., Nicol, A.J., and Such, C.H., “Low Emission Heavy Duty Diesel Engine for Europe”, SAE Paper, 620-631, 1993.

Schafer, F., and Basshuysen, R. V., Reduced Emissions and Fuel Consumption in Automobile Engines, Springer-Verlag Press, Germany, 6, 1995.