



**BİYODİZEL KULLANILAN DİZEL MOTORLARDA NO_x EMİSYONLARININ
VE NO_x EMİSYONLARI AZALTMA YÖNTEMLERİNİN İNCELENMESİ**

Bilal AYDOĞAN

**Ağustos 2008
DENİZLİ**

**BİYODİZEL KULLANILAN DİZEL MOTORLARDA NO_x EMİSYONLARININ
VE NO_x EMİSYONLARI AZALTMA YÖNTEMLERİNİN İNCELENMESİ**

**Pamukkale Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Yüksek Lisans Tezi
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı**

Bilal AYDOĞAN

Danışman: Doç. Dr. Nazım USTA

**Ağustos, 2008
DENİZLİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ ONAY FORMU

Bilal AYDOĞAN tarafından Doç. Dr. Nazım USTA yönetiminde hazırlanan “Biyodizel Kullanılan Dizel Motorlarda NO_x Emisyonlarının ve NO_x Emisyonları Azaltma Yöntemlerinin İncelenmesi ” başlıklı tez tarafımızdan okunmuş, kapsamı ve niteliği açısından bir Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.



Yrd. Doç. Dr. Hasalettin DELİGÖZ

Jüri Başkanı



Doç. Dr. Nazım USTA

Jüri Üyesi (Danışman)



Yrd. Doç. Dr. Erdal UĞUZDOĞAN

Jüri Üyesi

Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun

27/08/2008 tarih ve 14/22 sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. Mehmet Ali SARIGÖL

Müdür

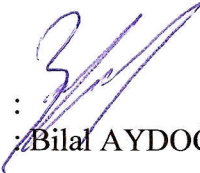
TEŞEKKÜR

Bu çalıőmayı gerçekleőtirmemde benden maddi ve manevi hiçbir desteğini esirgemeyen, her türlü fedakarlığı gösteren tez danıőmanım Doç. Dr. Nazım USTA'ya, yüksek lisans eğitimim boyunca çalıőmalarımda bana destek olan ve her zaman yanımda olan aileme sonsuz teőekkürlerimi sunarım. Ayrıca bu yüksek lisans alıőması TÜBİTAK 104M256 no'lu proje kapsamında TÜBİTAK tarafından desteklendiği için TÜBİTAK'a teőekkürlerimi sunarım.

Bu tezin tasarımı, hazırlanması, yürütülmesi, araştırmalarının yapılması ve bulgularının analizlerinde bilimsel etiğe ve akademik kurallara özenle riayet edildiğini; bu çalışmanın doğrudan birincil ürünü olmayan bulguların, verilerin ve materyallerin bilimsel etiğe uygun olarak kaynak gösterildiğini ve alıntı yapılan çalışmalara atfedildiğini beyan ederim.

İmza

Öğrenci Adı Soyadı

: 

: Bilal AYDOĞAN

ÖZET

BIYODİZEL KULLANILAN DİZEL MOTORLARDA NO_x EMİSYONLARININ VE NO_x EMİSYONLARI AZALTMA YÖNTEMLERİNİN İNCELENMESİ

Aydoğan, Bilal

Yüksek Lisans Tezi, Makine Mühendisliği ABD

Tez Yöneticisi: Doç. Dr. Nazım USTA

Temmuz 2008, 81 sayfa

Biyodizel yakıtlar sıkıştırma ateşlemeli motorlar için yenilenebilir alternatif yakıtlar olarak incelemeye alınmaktadır. Biyodizel yakıtlar farklı oranlarda sıkıştırma ateşlemeli motorlarda değişiklik yapılmadan kullanılabilir yakıtlardır. Biyodizel ile dizel yakıt No.2 arasında önemli bir yapısal fark biyodizelin kütle bazda %10-12 arasında oksijen içermesidir. Bu da motorun tork ve gücünü azaltmaya sebep olacak yakıtın ısı değerinin düşmesine sebep olmaktadır. Bununla birlikte, yakıt içerisindeki oksijen yanmanın iyileşmesine ve dolayısı ile is, CO ve HC gibi emisyonların azalmasına sebep olmaktadır. Bitkisel yağların içerisinde dizel yakıtı göre çok az kükürt bulunmasından dolayı, karışımdaki biyodizel oranına bağlı olarak SO₂ emisyonunda azalma olmaktadır. Biyodizelin emisyonlar açısından en önemli dezavantajı NO_x ile ilgilidir. NO_x emisyonları motor yakıt sistemi, motor tipi ve motor yükü gibi parametrelere bağlı olarak değişse de genel olarak biyodizel kullanımı ile yakıt içerisindeki oksijenden ve yanma odasındaki yüksek sıcaklıktan dolayı NO_x emisyonlarında artma olmaktadır.

Bu çalışmada, kanola, atık bitkisel yağlar, tütün tohumu yağı ve sabun stoklarından katalizör olarak sodyum hidroksit/ sülfürik asit, alkol olarak metanol kullanılarak laboratuvar ortamında biyodizel üretimleri yapılmıştır. Üretilen biyodizeller farklı oranlarda oda sıcaklığında dizel yakıt No.2 ile karıştırılmıştır. Karışımlar ve dizel yakıt No.2, ön yanma odalı turbo dizel bir motorda tam yükte farklı dönme sayılarında test edilmiştir. Dizel Yakıt No.2'ye biyodizel ilavesinin NO_x, CO, SO₂, is ve performans parametrelerine etkileri incelenmiştir. Ayrıca sıkıştırma ateşlemeli motorlarda NO_x azaltma yöntemleri üzerinde araştırmalar yapılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Biyodizel, dizel motor, NO_x, egzoz emisyonları,

ABSTRACT

INVESTIGATION OF NO_x EMISSIONS IN DIESEL ENGINES FUELLED WITH BIODIESEL AND NO_x REDUCTION METHODS

Aydoğan, Bilal

M. Sc. Thesis in Mechanical Engineering

Supervisor: Assoc. Professor Nazım USTA

July 2008, 81 pages

Biodiesels have been considered as alternative renewable fuels for compression ignition (CI) engines. Biodiesel can be used in different proportions in CI engines without any modification. There is an important compositional difference between biodiesels and the diesel fuel. Biodiesels contain approximately 10–12% oxygen in weight basis. This leads to reduction in the energy content of the fuel resulting in lower engine torque and power. However, the oxygen in the fuel helps to reduce exhaust emissions such as smoke, CO and HC mainly due to the effect of complete combustion. Since vegetable oils includes very little sulphur compared to the diesel fuel No.2, some reduction in SO₂ emission is obtained depending on the proportion of biodiesel in the fuel. The main disadvantage of biodiesel on emissions is related to NO_x. Although NO_x emissions mainly depend on the engine fuelling system, engine type and engine loading, in general biodiesel usage increases NO_x emissions due to oxygen content of the fuel and higher temperatures of combustion chamber.

In this study, biodiesels were produced from canola oil, tobacco seed oil, soap stocks and waste vegetable oils using sodium hydroxide/sulphuric acid as catalyst and methanol as alcohol in laboratory conditions. The produced biodiesels were blended with diesel fuel No.2 in different proportions at the room temperature. The blends and diesel fuel No.2 were tested in an indirect injection turbocharged diesel engine at full load and different engine speeds. The effects of the biodiesel addition to diesel fuel No.2 on NO_x, CO, SO₂, smoke and performance parameters were investigated. In addition, different NO_x reduction techniques in compression ignition engines were examined.

Keywords: Biodiesel, diesel engines, NO_x, emissions.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
Yüksek Lisans Tezi Onay Formu.....	i
Teşekkür.....	ii
Bilimsel Etik Sayfası.....	iii
Özet.....	iv
Abstract.....	v
İçindekiler.....	vi
Şekiller Dizini.....	viii
Tablolar Dizini.....	x
Simge ve Kısaltmalar Dizini.....	xi
1. GİRİŞ.....	1
2. DİZEL YAKIT NO.2 VE BİYODİZEL.....	7
2.1. Dizel Yakıt No.2.....	7
2.2. Biyodizel.....	7
3. DİZEL MOTORLARDA YANMA VE NO _x OLUŞUMU.....	15
3.1. Dizel motorların çalışma prensibi.....	15
3.2. Dizel motorlarda yanma.....	15
3.2.1. Tutuşma gecikmesi.....	17
3.2.2. Ani (kontrolsüz) yanma.....	18
3.2.3. Difüzyon kontrollü yanma.....	19
3.2.4. Art yanma.....	20
3.3. Dizel Motorlarda Emisyonlar.....	20
3.3.1. NO _x emisyonları ve oluşum mekanizması.....	21
3.3.2. Partikül madde emisyonları.....	25
3.3.3. SO ₂ emisyonları.....	25
3.3.4. CO emisyonları.....	26
3.3.5. HC emisyonları.....	26
3.4. Biyodizel Kullanımının NO _x ve Diğer Emisyonlara Etkilerinin İncelenmesi.....	27
4. NO _x EMİSYONLARI AZALTMA TEKNİKLERİ.....	36
4.1. Egzoz Gazı Yeniden Sirkülasyonu (EGR).....	37
4.2. Seçici Katalitik İndirgeme (SCR).....	38
4.3. Katalitik Konvertörler.....	39
4.4. Nemli Hava Motorları.....	40
4.5. Direkt Silindir İçine Püskürtme.....	44
4.6. Yakıt-Su Karışımı.....	46
5. DENEY DÜZENEKLERİ VE TEST TEKNİKLERİ.....	47
5.1. Biyodizel Üretim Deney Düzeneği ve Teknikleri.....	47
5.1.1. Kanola yağı.....	50
5.1.2. Tütün tohumu yağı.....	50
5.1.3. Sabun stokları.....	51
5.1.4. Atık yağlar.....	53
5.2. Motor Test Düzeneği ve Teknikleri.....	55
6. MOTOR TEST SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRME.....	59
6.1. NO Emisyonları.....	62

6.2. CO Emisyonları.....	62
6.3. SO ₂ Emisyonları.....	63
6.4. İis Emisyonları	63
6.5. Motor Performans Parametreleri.....	63
7. SONUÇLAR.....	74
ÖZGEÇMİŞ	81

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 1.1 Yıllara göre benzinin tüketim miktarları	2
Şekil 1.2 Yıllara göre Türkiye motorin tüketimi.....	2
Şekil 1.3 Transesterifikasyon ile biyodizel üretiminin basitleştirilmiş hali.....	4
Şekil 1.4 Dünya biyodizel üretimi.....	5
Şekil 3.1 Püskürtme demetinde ilk tutuşmanın yeri.....	16
Şekil 3.2 Püskürtme demetinin modellenmiş hali.....	16
Şekil 3.3 Dizel motorunda yanma fazları ile silindir basıncının gelişimi.....	17
Şekil 3.4 Dizel motorlarda difüzyon kontrollü yanma sırasında emisyonların oluşumu.....	2
1	
Şekil 4.1 Dizel motor difüzyon alevi.....	37
Şekil 4.2 Konvertörün yeri.....	39
Şekil 4.3 Üç yollu konvertörde gerçekleşen kimyasal reaksiyonlar.....	40
Şekil 4.4 Katalitörün çalışma sıcaklığı aralığı.....	41
Şekil 4.5 Çeşitli basınç ve sıcaklıklarda havanın mutlak nemi.....	42
Şekil 4.6 1 atm ve 40 °C’de kuru havada damlacık buharlaşma zamanı.....	43
Şekil 4.7 Damlacık buharlaşma zamanına sıcaklığın etkisi.....	44
Şekil 4.8 Nemli hava motorunda yanma prosesindeki sıcaklık değişimi.....	45
Şekil 4.9 Direk su püskürtme için kullanılan nozul örneği.....	45
Şekil 5.1 Küçük ölçekte biyodizel üretimi için düzenek	47
Şekil 5.2 Biyodizel reaktörünün şematik görünüşü.....	48
Şekil 5.3 Biyodizel reaktörünün resmi.....	49
Şekil 5.4 Yağ çıkarma ünitesi.....	51
Şekil 5.5 Tütün tohumundan yağ çıkarılmasının safhaları.....	52
Şekil 5.6 Dietileter geri kazanım için soğutma ünitesi.....	53
Şekil 5.7 Atık yağlardan biyodizel üretmeden önce yapılan işlemler.....	54
Şekil 5.8 Viskozite ölçüm cihazı.....	56
Şekil 5.9 Deney sisteminin şematik resmi	56
Şekil 5.10 Deney sisteminin resmi	57
Şekil 5.11 Bosch BEA 170 duman ölçer	58
Şekil 5.12 Testo 350 M/XL gaz analizörü.....	58
Şekil 6.1 Rafine kanola yağı ve biyodizelinin sıcaklıkla viskozite değişimi.....	59
Şekil 6.2 Atık ayçiçek yağı ve biyodizelinin sıcaklıkla viskozite değişimi.....	60
Şekil 6.3 Tütün yağı ve biyodizelinin sıcaklıkla viskozite değişimi.....	60
Şekil 6.4 Sabun stoğu ve biyodizelinin sıcaklıkla viskozite değişimi.....	61
Şekil 6.5 NO emisyon değişimleri.....	65
Şekil 6.6 CO emisyon değişimi.....	66
Şekil 6.7 SO ₂ emisyon değişimi.....	67
Şekil 6.8 İS emisyon değişimi.....	68
Şekil 6.9 Güç değişimi.....	69
Şekil 6.10 Özgül yakıt tüketimi değişimi.....	70
Şekil 6.11 Termal verim değişimi.....	71
Şekil 6.12 Egzoz gazı sıcaklığı değişimi.....	72
Şekil 6.13 Yağlama yağı sıcaklığı değişimi.....	73

TABLolar DİZİNİ

	Sayfa
Tablo 1.1 Akaryakıt ürünlerinin Pazar payı.....	3
Tablo 1.2 Tohumlarında yağ içeren tek yıllık yağ bitkileri ve yağ içerikleri.....	5
Tablo 2.1 Motorin standardı (TSE 3082 EN 590).....	8
Tablo 2.2 Biyodizel standardı (ASTM D6751-07b)	9
Tablo 2.3 Biyodizel standardı (TS EN 14214)	10
Tablo 5.1 Kullanılan karışım atık yağlarının serbest yağ asitlik değerleri.....	54
Tablo 5.2 Deney motorunun teknik özellikleri	57

SİMGE VE KISALTMALAR DİZİNİ

dev/dak	Devir/dakika
ppm	Milyonda bir parça
IDI	İndirekt (ön yanma odalı) püskürtme
DI	Direkt püskürtme
ÜÖN	Üst ölü nokta
AÖN	Alt ölü nokta
KMA	Krank mili açısı
BXX	Karışımında XX oranı (%) kadar biyodizel içeren yakıt
cc	Mililitre
BTDC	Üst ölü noktadan önce
ATDC	Üst ölü noktadan sonra
PM	Partikül madde

1. GİRİŞ

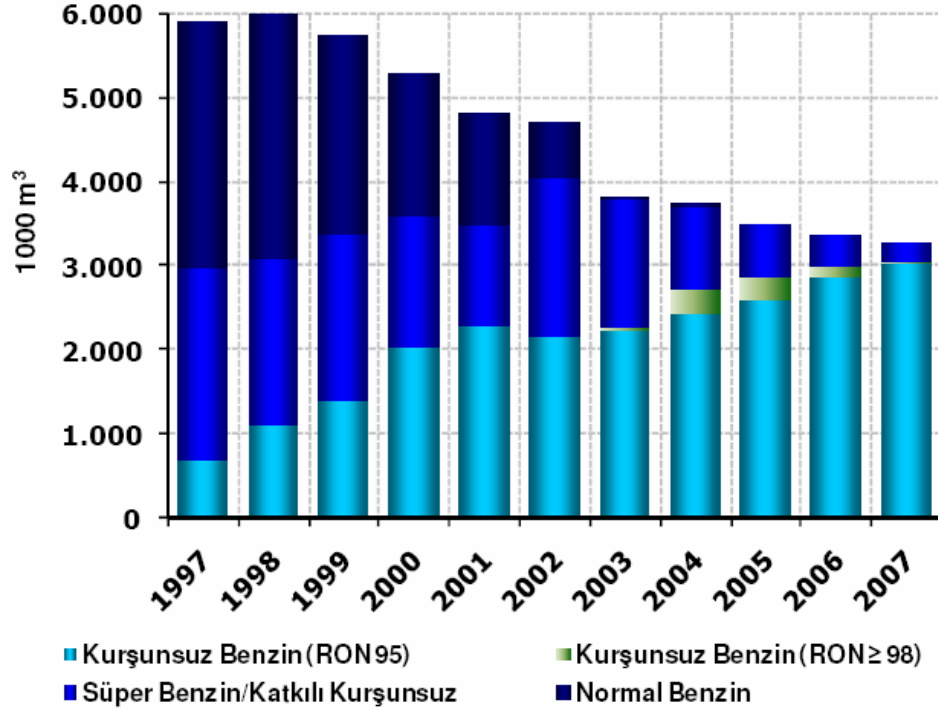
Petrol esaslı yakıtlar dünyada birçok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır. Gelişen teknoloji ile artan enerji ihtiyacını karşılamak üzere petrol esaslı yakıtların kullanımı da hızla artmaktadır. Bununla birlikte bilinen petrol rezervlerinin bugünkü kullanım hızı ile elli yıldan az bir süre ihtiyacı karşılayabilecek olması, alternatif enerji kaynakları ve alternatif yakıtlar üzerine çalışmaları hızlandırmıştır.

Petrol esaslı yakıtların kullanılmasında dikkat edilmesi gereken diğer bir konu ise artan çevre kirliliğidir. Petrol esaslı yakıtların kullanımı sonucu insan solunum sistemi, sinir sistemi ve çeşitli deri hastalıklarına yol açan CO, CO₂, HC, is, NO_x ve SO_x gibi zararlı emisyonlar oluşmaktadır. Bu zararlı emisyonlar ayrıca hayvanların sağlığı, bitki örtüsü ve ağaçlara da zarar vermektedir. Asit yağmurları da bu zararlı emisyonların bir kısmının etkisiyle gerçekleşmektedir. Bundan dolayı da hem insan sağlığına hem de çevreye daha az zararlı alternatif yakıtların araştırılması kaçınılmaz olmuştur (Shaid ve Jamal 2008).

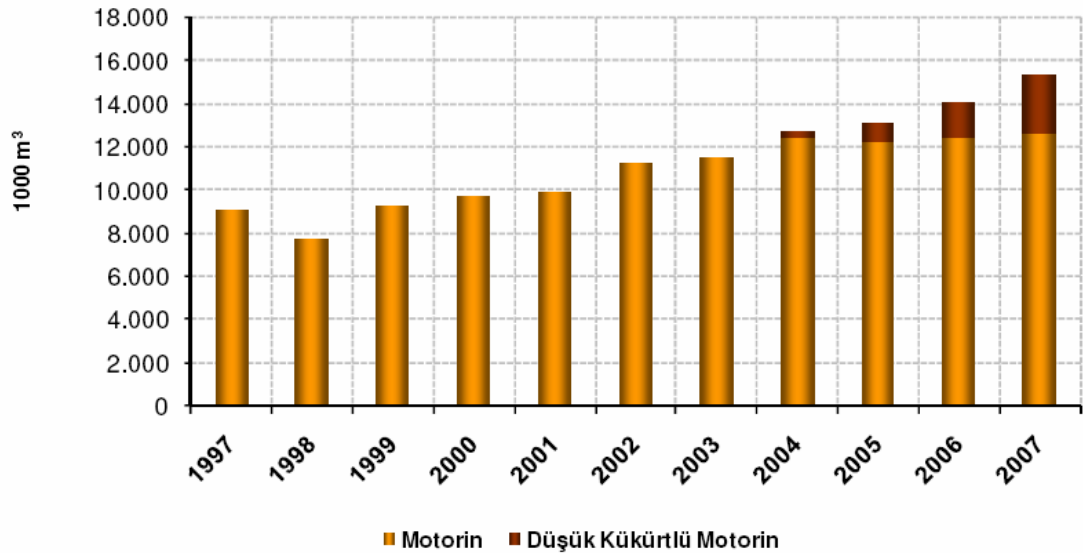
Türkiye’de de günden güne petrol esaslı yakıtların kullanımı araç sayısına da bağlı olarak artmaktadır. Bu da yakıtlardan kaynaklanan emisyonların daha fazla olmasına neden olmaktadır. Dizel yakıt No.2’nin otobüs, traktör, kamyon gibi taşımacılık ve ticari araçlarda kullanılmasından dolayı tüketimi benzine göre daha fazladır. Bununla birlikte binek taşıtlarda da dizel yakıt kullanan motorların kullanımı artmaktadır. Şekil 1.1 ve Şekil 1.2’de görüldüğü gibi benzin kullanımı geçmiş yıllara oranla düşerken, motorin kullanımı özellikle 1998 yılında başlayan yükselişine her yıl devam etmektedir. Motorin kullanımı 2007 yılında 2006 yılına oranla %8,1 artarak 15,33 milyon metreküp değerine ulaşmıştır. Ayrıca son yıllarda kükürt içeriği az olan motorin kullanımının artış gösterdiği de görülmektedir. Buradaki değerler resmi kayıtlara göredir. Bunun dışında kayıt dışı kaçak akaryakıtın özellikle motorin tüketimi değerlerini daha da artıracığı tahmin edilmektedir. Tablo 1.1’de görülen pazar payları motorinin ne kadar büyük bir kullanım alanına sahip olduğunu açıkça göstermektedir.

Alternatif yakıtlar içinde en fazla ön plana çıkan etanol ve biyodizel gibi biyokütle yakıtlardır. Etanol buji ateşlemeli motorlarda benzin için, biyodizel ise dizel motorlarda dizel yakıt No.2 için alternatif yakıtlardır. Türkiye’de araçlarda kullanılan dizel yakıt

ihtiyacının motorin standardında izin verilen oran olan %5'lik kısmının biyodizel ile karşılanabilmesi için 766.500 m³ biyodizel yakıt üretimine ihtiyaç duyulmaktadır.



Şekil 1.1 Yıllara göre benzinin tüketim miktarları (WEB_1 2008)



Şekil 1.2 Yıllara göre Türkiye motorin tüketimi (WEB_1 2008)

Bitkisel yağların sıkıştırma ateşlemeli motorlarda kullanılması bu tip motorun ilk icadına kadar dayanır. Sıkıştırma ateşlemeli motorun patentini 1892'de alan Rudolf

Diesel 1900 yılında yer fıstığı yağıyla motoru çalıştırmış ve başarılı sonuçlar elde etmiştir (McDonnell vd 1999).

Tablo 1.1 Akaryakıt ürünlerinin 2007 yılı için pazar payı (WEB_2 2008)

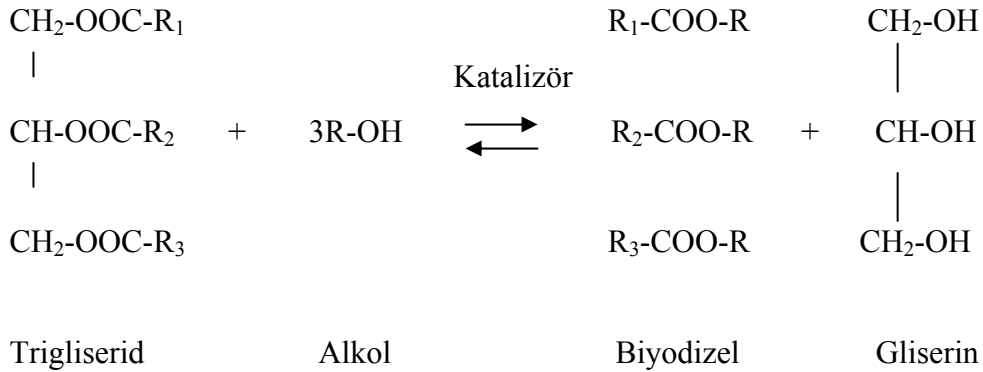
Ürünler	Pay (%)
Motorin	60
Fuel Oil-6	21
95 Oktan Kurşunsuz Benzin	10
Süper Benzin	4
Kalorifer Yakıtı	4
98 Oktan Kurşunsuz Benzin	1
Toplam	100

1940 yıllarında birçok petrol yatağının bulunması ile petrolün işlenmesi ve çıkarılması daha kolay ve ucuz hale gelmiştir. Bu yüzden bitkisel yağların dizel motorlarda kullanımı üzerine yapılan çalışmalar önem kaybetmiştir. 1970’li yıllarda, petrolün bazı ülkelerin tekelinde olması, çevresel ve ekonomik nedenlerden dolayı alternatif yakıtlar üzerine çalışmalar tekrar önem kazanmıştır.

Bitkisel yağların dizel motorda saf halde kullanılmasının yağın özelliklerinden kaynaklanan bazı sorunları bulunmaktadır. Bitkisel yağların yüksek viskoziteleri ve yüksek moleküler ağırlıkları nedeniyle doğrudan dizel motorlarda kullanılmaları ile enjektör iğnesi tıkanması ve bozulması, yağlama yağı seyrelmesi, piston segmanı sıkışması, silindir yüzeylerinin aşınması, fakir atomizasyon, düşük buharlaşma, tamamlanmamış yanma ve kalıntılar gibi problemler ortaya çıkmaktadır. Ayrıca saf bitkisel yağların soğuk akış özellikleri de kötü olduğu için soğuk havalarda akma ve donma problemleri ortaya çıkmaktadır. Bitkisel yağların bu olumsuz özelliklerini iyileştirmek için proliz, karışım, mikro emulsiyon ve transesterifikasyon gibi çeşitli yöntemler geliştirilmiştir (Graboski ve McCormick 1997).

Bu yöntemler içerisinde en yaygın ve etkili olanı ise transesterifikasyon yöntemidir. Transesterifikasyon yönteminde bitkisel veya hayvansal yağ alkolle birleşmekte ve biyodizelle birlikte değerli bir yan ürün olan gliserin oluşmaktadır. Şekil 1.3’de transesterifikasyon oluşum reaksiyonu gösterilmiştir. Reaksiyonda, R metanol veya etanol gibi kısa zincirli alkol, R₁, R₂ ve R₃ kullanılan yağa birleşik olan yağ asidi

zincirini göstermektedir. Doğal olarak bulunan bitkisel veya hayvansal yağlarda bu asitler çoğunlukla palmitik, stearik, oleik, linoleik ve linolenik asitlerdir (Knothe vd 2006).



Şekil 1.3 Transesterifikasyon ile biyodizel üretiminin basitleştirilmiş hali (Knothe vd 2006)

Transesterifikasyon yönteminde genellikle metanol kullanılmaktadır. Bunun nedeni metanolün diğer alkollere göre, bazı ülkeler hariç, daha ucuz olmasıdır. Örneğin Brezilya’da etanol daha ucuz olduğu için etil esterler kullanılmaktadır. Katalizörler asit, alkali ve enzim olmak üzere üçe ayrılmaktadır. Alkali katalizör kullanılan reaksiyonlar, asit kullanılanlara göre daha hızlı olmaktadır. Bununla birlikte eğer hammadde yüksek serbest yağ asitliği ve su içeriyorsa asit katalizör kullanılması daha uygun olmaktadır. Baz katalizör olarak sodyum hidroksit veya potasyum hidroksit, asit katalizör olarak ise genellikle sülfürik asit kullanılmaktadır (Ma ve Hanna 1999).

Transesterifikasyon yöntemini etkileyen parametreler olarak reaksiyon sıcaklığı, alkol-yağ oranı, katalizör miktarı, karıştırma şiddeti, kullanılan yağ, katalizör cinsi sayılabilir. Artan reaksiyon zamanıyla yağ-biyodizel dönüşüm oranı da artmaktadır. Transesterifikasyon sıcaklığı kullanılan alkolle ilgili olmakla birlikte genel olarak 60°C olarak seçilmektedir. Alkol-yağ oranı iyi ayarlanmadığı takdirde yağın biyodizele dönüşmesi için gereken oran sağlanamayacak, bu da reaksiyonun istenilen seviyede olmasını engelleyecektir (Marchetti vd 2007).

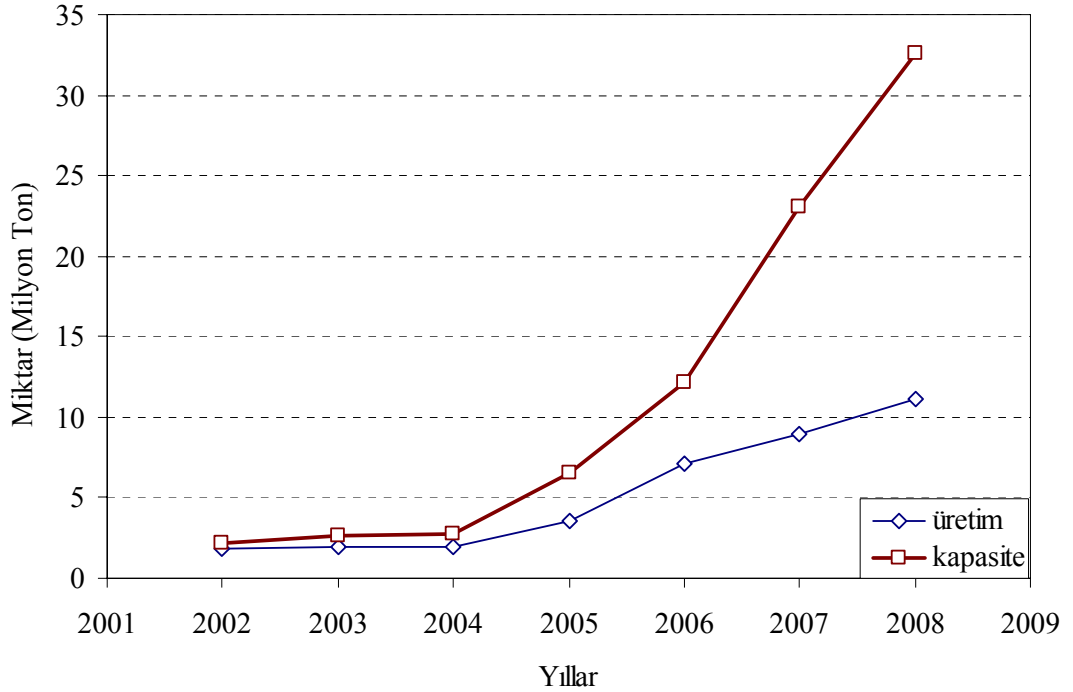
Dünyada biyodizel üretiminde en fazla kullanılan yağ kanola yağıdır. Bununla birlikte ayçiçek, soya, pamuk, palm gibi bitkisel yağların yanında atık kızartma yağları

da kullanılmaktadır (Korbitz 2002). Tablo 1.2’de tohumlarında yağ içeren tek yıllık tipik yağ bitkileri ve yağ içerikleri gösterilmektedir.

Tablo 1.2 Tohumlarında yağ içeren tek yıllık yağ bitkileri ve yağ içerikleri (WEB_3 2008)

BİTKİLER	YAĞ ORANLARI (%)
Ayçiçeği	22-50
Soya	18-24
Yerfıstığı	40-60
Kanola	40-50
Aspir	20-25
Keten	30-45
Kenevir	30-32
Hintyağı	50-60

Şekil 1.4 dünyada biyodizel üretimiyle birlikte biyodizel üretim kapasitesini de göstermektedir. Biyodizel üretim kapasitesi hızla artarken üretimin daha alt seviyelerde kaldığı görülmektedir.



Şekil 1.4 Dünya biyodizel üretimi (WEB_4 2008)

Biyodizel yenilenebilir alternatif bir yakıt olmasının yanında çevreci de bir yakıttır. Egzoz emisyonları yönünden, NO_x emisyonları dışında, oldukça iyi yönde gelişmeler sağlamaktadır. Birçok çalışmada biyodizel kullanımı ile CO ve CO₂ emisyonlarında azalma tespit edilmiştir (Labeckas ve Slaviskans 2006, Lin vd. 2007, Çanakçı 2007). SO₂ emisyonu yakıtın içerdiği kükürten kaynaklandığı ve biyodizel içerisinde kükürt içeriği düşük olduğu için, bu emisyon biyodizel kullanımı ile biyodizel oranına bağlı olarak düşmektedir. İS ve partikül madde emisyonları biyodizel için yapılmış birçok çalışmada dizel yakıtla oranla daha düşük bulunmuştur (Zheng vd 2008, Wu vd 2007). Yapılan birçok çalışmada biyodizel kullanımı ile CO, CO₂, partikül madde, HC, SO_x gibi emisyonlar düşerken NO_x emisyonlarında dizel yakıt No.2'ye göre artış tespit edilmiştir (Krahl vd 2002, Ulusoy vd 2004, Knothe vd 2006). Bundan dolayı biyodizel kullanımında en önemli konulardan biri NO_x emisyonlarının azaltılması olmaktadır.

NO_x emisyonları oldukça zehirli gazlardır. Ayrıca NO kokusuz gazının felç yapıcı etkisi de mevcuttur ve maksimum ortam değeri 9 mg/m³ olarak tanımlanmıştır (Haşimoğlu ve İçingür 2000). Ayrıca sulara giren azot oksitler bitki örtüsünün gelişmemesine, durmasına ve ekosistemin bozulmasına neden olur. NO_x emisyonlarından oluşan özellikle N₂O küresel ısınmada etkili olmaktadır. N₂O küresel ısınmada, CO₂'den 310 kat daha fazla potansiyele sahiptir (Fernando vd 2006).

Bu çalışmada, laboratuvar ortamında üretilen farklı biyodizellerin farklı oranlarda ön yanma odalı turbo dizel bir motorda kullanılması sonucu NO_x emisyonları, diğer emisyonlar ve performans parametrelerindeki değişim ortaya konulmuştur. Bununla birlikte dizel motorlarda biyodizel kullanımı ile NO_x emisyonlarının oluşum nedenleri ve bu emisyonların azaltılma yöntemleri üzerinde de çalışmalar yapılmıştır.

2. DİZEL YAKIT NO.2 VE BİYODİZEL

2.1. Dizel Yakıt No.2

Sıkıştırma ateşlemeli motora sahip araçlarda kullanılan yakıt (motorin) dizel yakıt No.2 olarak adlandırılmaktadır. Dizel yakıt No.1 ise kerosen ya da gaz yağı olarak bilinmekte, kış aylarında dizel yakıt No.2'ye az miktarda ilave edilerek soğuk akış özelliği iyileştirilmektedir.

Türkiye'de dizel yakıt No.2 için TSE 3082 EN 590 standardı geçerlidir. Tablo 2.1'de TSE 3082 EN 590 standardı verilmiştir. Biyodizel ile ilgili olarak bu standartta en önemli nokta dizel yakıt No.2'ye %5 metil ester ilave edilmesine izin verilmiş olmasıdır.

2.2. Biyodizel

Türkiye'de biyodizel için Avrupa Birliğinin EN 14214 standardı aynen kabul edilmiştir. Amerika'da geçerli olan standart ise ASTM D6751 standartıdır. EN 14214 standartı ile ASTM D6751 standartı arasında birkaç özellik farklıdır. ASTM standartında iyot sayısı belirtilmemişken, EN 14214 standartında iyot sayısı 120 ile sınırlandırılmıştır. İyot sayısı biyodizelin oksidasyon kararlılığı ve tortuyla ilgili bir parametredir. ASTM standartında setan sayısı 47 ile sınırlandırılmışken, EN 14214 standartında minimum değer olarak 51 gösterilmiştir. EN 14214 standartında yoğunluk değeri sınırlandırılmışken, ASTM standartında yoğunluk değeri belirtilmemiştir (WEB_5 2008). Tablo 2.2 ve Tablo 2.3'de bu biyodizel standartları verilmiştir. Tablo 2.2 ve Tablo 2.3'de geçen özellikleri hakkında kısa açıklamalar aşağıda bulunmaktadır.

Ester muhtevası; ester içeriği biyodizel kalitesini belirleyen faktörlerden biridir. EN 14214 standardında en az %96.5 olarak belirtilmiştir. Biyodizelin yüzde kaçının metil veya etil ester olduğunu gösterir. Biyodizele konulan her katkı maddesi ester içeriği oranını düşürmektedir. Donma geciktirici, antioksidan gibi katkı maddelerinin biyodizele konması sonucu ester içeriği azalmaktadır. ASTM standartında metil ester içeriği belirtilmemiştir.

Yoğunluk; biyodizel için önemli parametrelerden biridir. Biyodizelin yoğunluğu yağın yapısına bağlı olmakla birlikte, üretim tekniğine de bağlıdır. Yüksek yoğunluk

reaksiyon sonunda gliserinin tam olarak uzaklaştırılmadığı anlamına gelir. Yağ asidi kompozisyonu biyodizelin fiziksel özelliklerinde önemli etkilere sahiptir.

Tablo 2.1 Motorin standardı (TSE 3082 EN 590)

Özellik	Birim	Sınırlar		Deney Yöntemi
		En az	En çok	
Setan sayısı		51	—	EN ISO 5165
Setan indisi		46	—	EN ISO 4264
Yoğunluk, 15 °C	kg/m ³	820	845	EN ISO 3675 EN ISO 12185
Polisiklik aromatik hidrokarbonlar	% (kütle)	—	11	EN 12916
Kükürt	mg/kg	—	350 (31.12.2004'e kadar) veya 50	EN ISO 20846 EN ISO 20847 EN ISO 20884
			10	EN ISO 20846 EN ISO 20884
Parlama noktası	°C	55	—	EN 22719
Karbon kalıntısı (%10 damıtma kalıntısında)	% (kütle)	—	0,3	EN ISO 10370
Kül	% (kütle)	—	0.01	EN ISO 6245
Su	mg/kg	—	200	EN ISO 12937
Toplam kirlilik	mg/kg	—	24	EN ISO 12662
Bakır şerit korozyonu (3h, 50 °C)	Derece	1		EN ISO 2160
Oksidasyon kararlılığı	g/m ³	—	25	EN ISO 12205
Yağlama özelliği düzeltilmiş aşınma izi çapı (wsd 1,4) 60 °C	µm	—	460	EN ISO 12156-1
Viskozite (40 °C)	mm ² /s	2	4,5	EN ISO 3104
Damıtma		—	—	
250°C' de elde edilen %(hacim/hacim)	% (hacim)	—	<65	
350°C' de elde edilen %(hacim/hacim)	% (hacim)	85	—	
%95'in (hacim/hacim)elde edildiği sıcaklık	°C	—	360	
Yağ asidi metil esteri (YAME)	% (hacim)	—	5	EN 14078

Tablo 2.2 Biyodizel standardı (ASTM D6751-07b 2007)

Özellik	Birim	Sınırlar		Deney yöntemi
		En az	En çok	
Kalsiyum ve magnezyum içeriği	ppm	-	5	EN 14538
Parlama noktası	°C	93	-	D 93
Alkol kontrolü (1. veya 2.'den biri olmalı)				
1.Metanol içeriği	% (hacim)	-	0.2	EN 14110
2.Parlama noktası	°C	130		D 93
Su ve Kalıntı	% (hacim)	-	0.05	D 2709
Kinematik viskozite, 40 °C	mm ² /s	1.9	6.0	D 445
Sülfatlanmış kül muhtevası	% (kütle)	-	0.02	D 874
Sülfat				
S 15 derece	% (kütle)	-	0.0015	D 5453
S 500 derece	% (kütle)	-	0.05	D 5453
Bakır şerit korozyonu		-	No:3	D 130
Setan sayısı		47	-	D 613
Donma noktası	°C	rapor	-	D 2500
Karbon içeriği	% (kütle)	-	0.05	D 4530
Asit sayısı	mg KOH/g	-	0.5	D 664
Serbest gliserin	% (kütle)	-	0.02	D 6584
Toplam gliserin	% (kütle)	-	0.240	D 6584
Fosfor içeriği	% (kütle)	-	0.001	D 4951
Damıtma, T90 AET	°C	-	360	D 1160
Sodyum ve Potasyum içeriği	ppm	-	5	EN 14538
Oksidasyon kararlılığı	h	3	-	EN 14112

Yağ asidi kompozisyonu sadece ürün türüne bağlı değildir, ayrıca iklim koşullarına, toprak türüne, bitkinin yapısına, ve bitkinin hasat için olgunluğuna bağlıdır (Tate vd 2006). Dizel No.2 yakıtın yoğunluğu TSE 3082 EN 590 standartlarında 0.82 - 0.845 g/cm³ değerleri arasında sınırlandırılmıştır. Biyodizelin yoğunluğu EN 14214 stardartında 0.86 ve 0.90 g/cm³ değerleri arasında belirtilmiştir. Yani biyodizelin yoğunluğu dizel No.2 yakıttan daha fazladır. Yoğunluğun yüksek olmasıyla püskürtülen yakıt miktarı kütle bazında artmaktadır (Graboski ve McCormick 1997).

Tablo 2.3 Biyodizel standardı (TS EN 14214 2005)

Özellik	Birim	Sınırlar		Deney Yöntemi
		En az	En çok	
Ester muhtevası	% (kütle)	96,5	—	EN 14103
Yoğunluk (15 °C)	kg/m ³	860	900	EN ISO 3675 EN ISO 12185
Viskozite (40 °C)	mm ² /s	3,5	5	EN ISO 3104
Parlama Noktası	°C	120		EN ISO 3679
Kükürt muhtevası	mg/kg	—	10	EN ISO 20846 EN ISO 20884
Karbon kalıntısı (%10 damıtma kalıntısında)	% (kütle)	—	0,3	EN ISO 10370 —
Setan sayısı		51		EN ISO 5165
Sülfatlanmış kül muhtevası	% (kütle)	—	0,02	EN 3987
Su muhtevası	mg/kg	—	500	EN ISO 12937
Toplam kirlilik	mg/kg	—	24	EN 12662
Bakır şerit korozyonu (50 °C, 3 saat)	derece	Sınıf 1		EN ISO 2160
Oksidasyon kararlılığı (110 °C)	h	6	—	EN 14112
Asit sayısı	mg KOH/g	—	0,5	EN 14404
İyot sayısı	g iyot/100 g	—	120	EN 14111
Linolenik asit metil esteri	% (kütle)	—	12	EN 14103
Çoklu doymamış (>4 çift bağ) metil esterleri	% (kütle)	—	1	—
Metanol muhtevası	% (kütle)	—	0,2	EN 14110
Monogliserit muhtevası	% (kütle)	—	0,8	EN 14105
Digliserit muhtevası	% (kütle)	—	0,2	EN 14105
Trigliserit muhtevası	% (kütle)	—	0,2	EN 14105
Serbest gliserol	% (kütle)	—	0,02	EN 14105 EN 14106
Toplam gliserol	% (kütle)	—	0,25	EN 14105
Grup I metaller (Na+K)	mg/kg	—	5	EN 14108 EN 14109
Grup 2 metaller (Ca+Mg)	mg/kg	—	5	prEN 14538
Fosfor muhtevası	mg/kg	—	10	EN 14107

Viskozite; biyodizel ve bitkisel yağlar arasındaki en önemli fark viskozitedir. Genelde viskozite moleküllerin bağ kuvvetlerinin integrali olarak belirtilebilir. Moleküller arasındaki kuvvet çok güçlü olduğu zaman birbirleriyle sıkı halde bulunurlar ve

birbirleri üzerinde kayamazlar ve yapı katı olarak adlandırılır. Enerji veya sıcaklık belirli bir seviyeye yükseltildiğinde moleküller birbirleri üzerinde kayarlar. Eğer sıcaklık erime noktasına çok iyi şekilde arttırılırsa, birbirleri üzerinden hızla geçerler ve akışkan daha az viskoz olur. Molekül bağ kuvveti zincir uzunluğu arttıkça artar (Krisnangkura vd 2006). Viskozitenin etkisi atomizasyon ve yanmanın özelliğinde görülebilir. Daha yüksek viskozite biyodizeli daha iyi bir yağlayıcı yapar. Diğer yandan, biyodizelin yüksek viskozitesi fakir atomizasyona yol açarken enjektör kirlenmelerine de neden olur (Tate vd 2005). Biyodizel yakıtların özellikle düşük sıcaklıklardaki viskozitelerinin artışı önemli bir sorun olarak görülmektedir.

Parlama noktası: parlama noktası yakıtın alev oluşturmaya yetecek kadar buharlaşacağı sıcaklık olarak tanımlanır. Bu sıcaklık dizel yakıt No.2 için 52-66 °C olarak verilirken, biyodizelin parlama noktası 150°C'den yüksektir (Knothe vd 2006). Biyodizelin parlama noktası dizel No.2'den daha yüksek olmasının sonucu tutuşma zorlaşır, taşıma ve depolamada daha güvenli bir şekilde yapılabilir (Shaid ve Jamal 2008).

Kükürt muhtevası: biyodizel yakıtlar bünyelerinde çok az kükürt içerirler. Eğer yakıt kükürt muhteva ediyorsa, bu kükürt oksijenle reaksiyona girip kükürtdioksit ya da kükürttrioksite dönüşür. Daha sonra su buharıyla reaksiyona girip sülfürik asit ve diğer sülfür bileşenlerine dönüşebilir. Sülfürik asit egzoz sistemine zarar vermektedir (Knothe vd 2006). Ayrıca bu gazların solunması da insan sağlığı için zararlıdır. Asit yağmurlarının oluşmasına da neden olur.

Karbon kalıntısı: yakıtın enjektör nozullarında ve yanma odasında tortu bırakma eğiliminin bir ölçüsüdür. Karbon kalıntısının yüksek değerleri gliserin, serbest yağ asidi ve katalizör kalıntısının varlığıyla ve daha yüksek doymamış çoklu yağ asidi ve polimer içeriğiyle bağlantılıdır (Cvengros vd 2006, Fernando vd 2006).

Setan sayısı: yakıtın tutuşma kabiliyetini gösteren bir parametredir. Setan sayısı ne kadar yüksekse yakıtın tutuşması o kadar kolay olmaktadır. Bu da dizel motorlarda vuruntu dediğimiz olayın oluşmasına engel olmaktadır. Biyodizelin setan sayısı elde edildiği kaynağa göre değişiklik göstermektedir. Kızartma yağı ya da hayvansal yağlardan elde edilenler gibi yüksek derecede doymuş esterler, en yüksek setan sayısı

göstermeye meyillidirler. Biyodizelin dizel No.1 veya No.2 ile karışımı durumlarında ise setan sayısı karışımdaki ester oranıyla orantılı olarak değişir (WEB_6 2008). Bununla birlikte yağ asidinin zincir uzunluğu setan sayısını yükseltir, çift bağ sayısı ve çift bağların zincirin ortasına doğru hareketiyle düşer (Graboski ve McCormick 1997).

Su muhtevası; dizel ve biyodizel yakıtlar motorda yağlama görevi de yapmaktadırlar. Yakıtta suyun bulunması motor yakıt sisteminde korozyona neden olacaktır. Bu korozyon neticesinde aşınma sonucu kopan parçacıklar yakıtta karışacaktır. Yakıtta karışan parçacıklar enjektör ve filtrelerin tıkanmasına neden olacaktır.

Bakır şerit korozyonu; biyodizelin bakır alaşımları üzerindeki korozyon etkisini gösterir. Yakıtın motor parçalarını korozyona uğratmama yönünden ne kadar uyumlu olduğunu gösterir.

Oksidasyon kararlılığı; depolama açısından çok büyük bir öneme sahiptir. Biyodizel içindeki oksidasyon ürünleri yakıtın depolama ömrünü etkileyecek ve tank, filtre ve yakıt sisteminde tortuların oluşmasına neden olacaktır (Graboski ve McCormick 1997). Yağın kimyasal yapısı biyodizelin oksidasyonunu etkilemektedir. Örneğin, soya yağı yüksek derecede doymamıştır ve bu onu oksitlenmeye meyilli kılmaktadır. Çift bağlarla yapışık metilen grupları serbest radikal saldırılara karşı hassastırlar. Aynı yağ asidi zincirindeki çoklu çift bağlar oksidasyona karşı daha hassastırlar (Monyem ve Gerpen 2001). Oksidasyon özelliği biyodizelin kalitesini etkiler. Oksidasyon kararlılığının yükseltilmesi biyodizelin uzun süreçte kullanılması açısından gereklidir. Oksidasyonu etkileyen parametreler hava, sıcaklık, ışık, antioksidanların varlığı, hidroperoksit gibi pro-oksidanların varlığı ve metal katalistlerdir (Dunn 2005).

Asit sayısı; biyodizelde bulunan serbest yağ asidinin bir ölçüsüdür. Bitkisel veya hayvansal yağdan biyodizel yakıtta dönüştürülürken serbest yağ asitliği değerinin düşürülmesi gerekmektedir. Asit sayısının fazla olması korozyona neden olabileceği gibi yakıtın jelleşme sıcaklığını da yukarılara çekmektedir. Ham yağların ya da kullanılmamış olan yağların asit değerleri, kullanılmış atık yağlara oranla daha düşüktür. Kızartma da kullanılan yağların asit sayıları yüksektir ve kullanım sayısına göre de yükselmektedir.

İyot sayısı: biyodizelin doymamışlık derecesinin bir ölçüsüdür. Doymamışlık depolama ya da tortu sorunlarına yol açmaktadır. Bitkisel veya hayvansal yağların iyot sayıları yerlerini alan metil esterlerinkileriyle yaklaşık olarak aynıdır. Bununla birlikte alkil esterlerin iyot sayıları daha fazla alkolle düşmektedir. İyot sayısının kullanılması biyodizelin oksidasyonu ile ilgilidir, fakat polimerizasyonu ve motor kalıntısını da etkilemektedir (Knothe vd 2006). Esterdeki doymamış yağ asidinin varlığı, yani iyot sayısının yüksek olması, motor yağındaki polimerizasyon tehlikesini yükseltmektedir (Prankl ve Wörgetter 1996).

Gliserol: hayvansal veya bitkisel yağların metil estere dönüşüm prosesinde yan ürün olarak ortaya çıkmaktadır (Knothe vd 2006). Biyodizel üretimi esnasında oluşan daha fazla yoğun bir yapıda olan gliserol genellikle ya çöktürerek bekleme yöntemiyle ya da santrifüj yöntemiyle biyodizelden ayrıştırılır. Biyodizel içinde serbest veya bağlı olmak üzere iki şekilde gliserol bulunur. Gliserolün ayrıştırılmasına rağmen biyodizel içerisinde az bir miktar serbest gliserol kalabilmektedir. Ayrıca, biyodizel içerisinde çok az miktardaki mono-, di- ve trigliserit içerisinde de bağlı gliserol bulunmaktadır. Bu ikisinin toplam miktarı da toplam gliserol olarak adlandırılır. Dizel yakıt içindeki gliserole limitlerin konmasının nedeni fazla olması durumunda tortu oluşumuna yol açmasıdır. Biyodizel içinde fazla miktarda gliserolün olması biyodizel soğuk akış özelliklerini de kötü yönde etkilemektedir.

Biyodizel soğuk akış özellikleri: biyodizellerin kullanılmasını kısıtlayan en önemli faktörlerden biri de düşük sıcaklıklardaki gösterdikleri davranışlardır. Biyodizel yakıtların düşük sıcaklık özellikleri dizel yakıt No.2'ye göre daha kötüdür ve daha yüksek sıcaklıkta kristalleşme göstermektedir. Ayrıca biyodizel yakıtların akma ve bulutlanma noktaları da dizel yakıtlardan daha yüksektir. Bu da biyodizelin kullanılmasını oldukça sınırlı hale getirmektedir. Biyodizelin kötü soğuk akış özellikleri düşük sıcaklıkta filtreleri tıkayabilecek kadar jel olmaya başlaması veya yakıt tankından motora pompalanamayacak kadar viskozitesinin artması gibi önemli problemlere neden olmaktadır. Yakıt atomizasyonu viskozite, yoğunluk ve yüzey geriliminden etkilenmektedir. Yüksek viskozite ve yoğunluk yakıtın atomizasyonunu kötüleştirir (Joshi ve Pegg 2007). Bununla birlikte biyodizelin bulutlanma ve donma noktası dizel yakıt No.2 ile karıştırılarak veya çeşitli katkı maddeleri kullanılarak düşürülmektedir.

Biyodizel kütüce %11 civarında oksijen içerir. Yakıttaki oksijenin varlığı daha iyi yanmanın gerçekleşmesine sebep olurken, biyodizelin ısı değeri yaklaşık %10-12 daha düşük olmasına sebep olmaktadır (Tat 2003). Dizel motorların NO_x üretimi çok karmaşıktır. Çünkü birçok faktörden etkilenir ve bunlardan birçoğu farklı seviyelerde birbirleriyle etkileşimdedir. NO_x emisyonları temel olarak yanma odasındaki yüksek sıcaklığın bir faktörüdür. Silindirdeki sıcaklığı, dolayısıyla NO_x emisyonlarını belirleyen iki ana yanma karakteristiği vardır. Bunlar yanma zamanı ve yanma oranıdır (Tat 2003).

Yanma zamanı silindirdeki piston pozisyonuyla ilişkili ve yanmanın başlangıcı ile bağlantılıdır. Erken yanma zamanı, yanmanın üst ölü noktaya daha yakında gerçekleşmesine, yanma prosesi boyunca basıncın artmasına, sıcaklığın artmasına ve NO_x emisyonlarının artmasına neden olur. Yanma zamanı dizel motorda temel olarak enjeksiyon zamanından, enjeksiyon başlangıcından ve tutuşma gecikmesinden etkilenir. Genel olarak biyodizel yakıtların setan sayısı dizel yakıt No.2'den daha yüksektir. Daha yüksek setan sayısı tutuşma gecikmesini kısaltır ve yanma zamanını öne alır. Biyodizel dizelden daha düşük enerji içerir ve bunu düzeltmek için fazla yakıt enjekte edildiği zaman bazı yakıt enjeksiyon pompaları enjeksiyon zamanının başlangıcını öne alırlar. Bu da NO_x 'un artmasına neden olur (Tat 2003).

3. DİZEL MOTORLARDA YANMA VE NO_x OLUŞUMU

3.1. Dizel motorların çalışma prensibi

Sıkıştırma ateşlemeli motorlar 2 veya 4 zamanlı olarak iki gruba ayrılırlar. İki zamanlı olanlar genellikle büyük ve güçlü yapılar için kullanılır. Dört zamanlı olanlar ise büyük, orta ve küçük güç isteyen taşıt, lokomotif gibi araçlarda kullanılırlar.

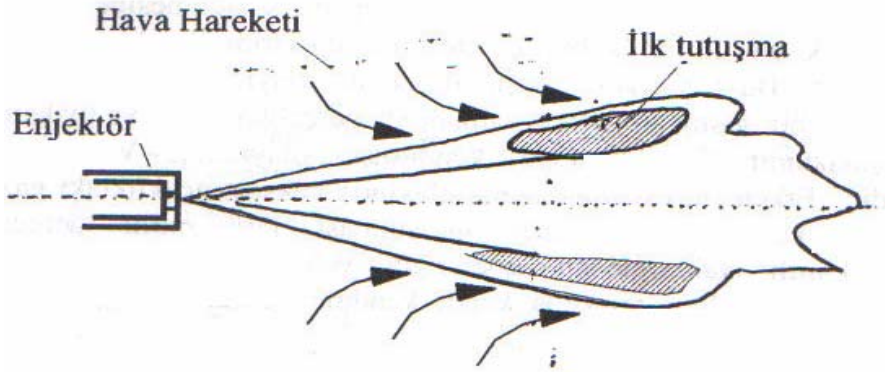
Dört zamanlı dizel motorların çalışma prensibinde zamanlar: emme zamanı, sıkıştırma zamanı, yanma ve genişleme zamanı ve egzoz zamanıdır. Piston üst ölü noktadan (ÜON), alt ölü noktaya (AÖN) doğru hareket ederken piston içine hava emilir. Bu zamana emme zamanı denilmektedir. Piston içine hava alındıktan sonra piston alt ölü noktadan üst ölü noktaya doğru ilerlerken havayı sıkıştırarak piston içindeki basınç ve sıcaklığı artırır. Sıkıştırma zamanı olarak adlandırılan bu safhada yanma için gerekli sıcaklık elde edilmektedir. Piston üst ölü noktaya gelmeden önce piston içine yakıt püskürtülür. Bu püskürtmeye püskürtme avansı denir. Püskürtülen yakıt sıkıştırma zamanında yükselmiş olan sıcaklık ve basınç sayesinde tutuşur. Genişleme stroku sonunda egzoz subabı açılarak silindir içindeki atık gazlar piston içinden egzoz zamanında atılmaktadır. Yanma ve genişleme zamanı sonucunda iş elde edilmektedir.

3.2. Dizel motorlarda yanma

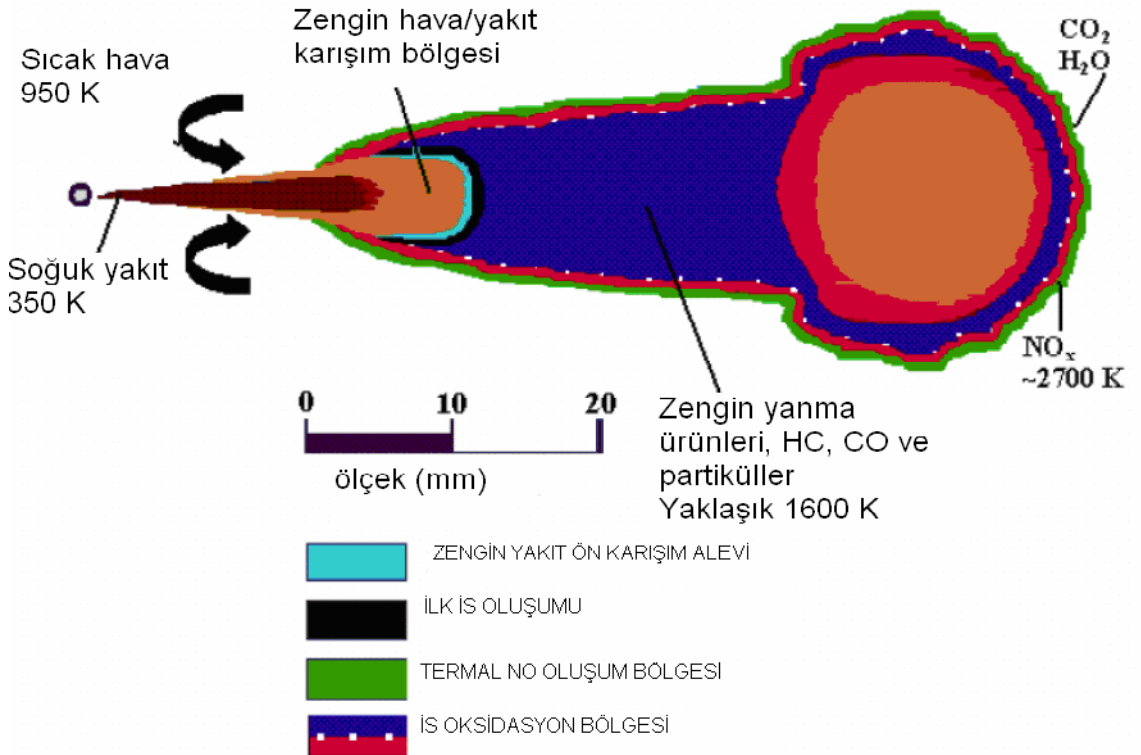
Dizel motorlarda yanma, yakıtın silindir içine püskürtülmesinden egzoz subabının yanma sonucu oluşan gazların dışarı atılmasını sağlamak için açılmasına kadar geçen süreyi kapsar. Yanma için üç etken gereklidir. Bunlar oksijen, sıcaklık ve yakıttır. Dizel bir motorda silindir içine alınan hava sıkıştırılarak havanın basıncının ve sıcaklığının artması sağlanır. Daha sonra enjektörden yakıtın püskürtülmesiyle üçüncü etkende tamamlanarak yanma başlar. Enjektörden püskürtülen yakıt damlacıklara bölünerek hava içine nüfuz eder. Yakıt damlacıkları dış yüzeyinden itibaren buharlaşmaya başlar ve çevresinde bulunduğu oksijenle birleşerek yanmaya başlar. Şekil 3.1 ve 3.2'de püskürtme demetindeki yanma olayı gösterilmektedir.

Dizel motorlarda yanma tutuşma gecikmesi, ani (kontROLSÜZ) yanma, difüzyon kontrollü yanma ve art yanma olarak 4 safhada gerçekleşir (Safgönül vd 1999). Şekil

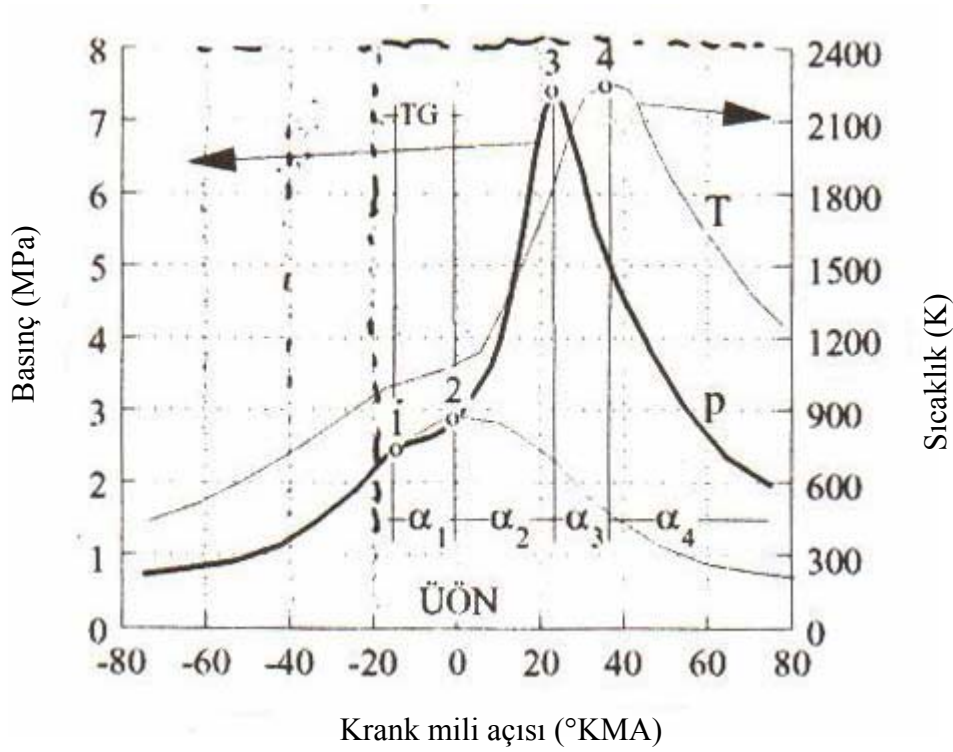
3.3'de yanmanın bu safhaları gösterilmektedir. 1-2 arası yakıtın püskürtülmesi ve tutuşmaya başlaması arasında geçen süre olan tutuşma gecikmesini, 2-3 tutuşma gecikmesinden sonra yakıtın ani yanarak basıncın maksimuma çıktığı ani yanmayı, 3-4 yanmanın hava/yakıt karışımı tarafından kontrol edildiği kontrollü yanmayı, 4'ten sonraki kısım ise kontrollü yanmadan sonra başlayan art yanmayı göstermektedir.



Şekil 3.1 Püskürtme demetinde ilk tutuşmanın yeri (Safgönül vd 1999)



Şekil 3.2 Püskürtme demetinin modellenmiş hali (Prior vd 2005)



Şekil 3.3 Dizel motorunda yanma fazları ile silindir basıncının gelişimi (Safgönül vd 1999)

3.2.1. Tutuşma gecikmesi

Tutuşma gecikmesi, dizel motorlarda püskürtmenin başlangıcı ile tutuşmanın başlangıcı arasındaki zaman aralığı olarak tanımlanır. Püskürtmenin başlaması enjektör iğnesinin yerinden kalktığı zaman olarak alınır. Tutuşmanın başlangıç zamanı tarifi ise bu kadar kolay değil aksine karmaşıktır. Çalışmalarda ortaya çıkan sonuç basınç noktasına bakarak tutuşma noktasına karar vermenin önemli hatalara neden olacağıdır. Bunun sebebi de alevin ilk görüldüğü noktanın basınç yükselmesinden daha sonra olmasıdır.

İyi atomizasyon, yüksek yakıt-enjeksiyon basıncı, küçük enjektör çapı, optimum yakıt viskozitesi ve enjeksiyon zamanında yüksek silindir hava basıncı gerektirir. Yakıt damlacıklarının buharlaşma oranı, damlaların boyutuna, dağılımlarına, hızlarına, yanma odasının içindeki basınç ve sıcaklığa ve yakıtın uçuculuğuna bağlıdır. Hava-yakıt karışım oranı çoğunlukla yanma odası tasarımı ve enjektöre bağlı olarak değişebilmektedir. Bazı yanma odaları ve piston üst şekli sıkıştırma sırasında türbülans

ve girdap sağlamak için tasarlanmıştır. Ayrıca, enjektör tasarım özellikleri, sayısı ve enjektör deliklerinin ayarı gibi özellikler yakıt püskürtme davranışını etkilemektedir. Her nozul deliğinin ayrıntıları püskürtme koni açısını etkiler. Yakıt demetinin havanın içine girişi, yakıt damlacıklarının boyutuna, enjeksiyon basıncına, hava yoğunluğuna ve hava-akım karakteristiğine bağlıdır (Heywood 1988).

Tutuşma gecikmesi ortam basıncından etkilenmektedir. Ortam basıncı arttıkça tutuşma gecikmesi azalmaktadır (Safgönül vd 1999). Tutuşma gecikmesinin kimyasal bileşenleri yakıtın ön yanma reaksiyonlarıyla kontrol edilir. Tutuşma, buharlaşma bölümünde olmasına rağmen oksidasyon reaksiyonları oksijenin içinde eridiği yakıt damlacıkları ve yakıt molekülleri arasında sıvı bölümde de ilerleyebilir. Ayrıca büyük hidrokarbon moleküllerinin daha küçük moleküllere bölünmesi de gerçekleşir. Bu kimyasal reaksiyonlar yakıt bileşenlerine, silindir dolgu sıcaklığı ve basıncına bağlıdır (Heywood 1988).

Dizel motorlarda emme havası sıcaklığının tutuşma gecikmesinin kısılması üzerine olumlu etkisi vardır. Emme havası sıcaklığı arttıkça tutuşma gecikmesi azalmaktadır (Safgönül vd 1999). Yakıtın tutuşma karakteristiği tutuşma gecikmesini etkilediği için bu özellik dizel motor çalışma karakteristiği için çok önemlidir; yakıt dönüşüm verimi, vuruntusuz çalışma, ateş almamak, egzoz emisyonları, ses ve çalışma kolaylığı gibi özellikleri etkiler. Sıkıştırma oranının artması ile sıcaklık ve basıncın artması gerçekleşecektir. Bunun sonucu olarak da tutuşma gecikmesi azalacaktır (Safgönül vd 1999).

Yakıtın tutuşma kabiliyeti setan sayısı ile tanımlanır. Düşük setan sayılı yakıt için tutuşma gecikmesi uzayacak ve yakıtın çoğunluğu tutuşma olmadan püskürtülecektir. Bu da çok hızlı yanma oluşumuna ve ani basınç yükselmelerine sebep olur. Bu olay sırasında duyulabilir bir vuruntu sesi ortaya çıkar ve bu olaya “dizel vuruntusu” denir (Heywood 1988).

3.2.2. Ani (kontROLSÜZ) yanma

Bu kısımda, tutuşma gecikmesi bölümünde silindire püskürtülmüş karışımın bir kısmı tutuşur ve ön karışım olarak yanmaya başlar. Basıncıta ani yükselme olur.

Basıncıdaki yükselme büyüklüğü ve oranı, tutuşma gecikmesinin uzunluğuna, çevrimdeki yanma odasındaki yakıt miktarına bağlıdır (Ban-Weiss vd 2007). Basıncın yükselme hızı fazla olduğunda motordaki silindir, piston, perno gibi parçalar birbirilerine çarpmasıyla yüksek ve sert bir ses çıkarırlar. Yukarıda bahsedildiği gibi bu dizel vuruntusu istenmeyen bir olaydır. Bunun engellenmesi yani motorun yumuşak çalışması için tutuşma gecikmesi süresi kısa tutulmalıdır. Dizel motorlarda basınç artışı genel olarak $0.2-0.3 \text{ MPa/}^\circ\text{KMA}$ dolaylarındadır ve $0.4-0.5 \text{ MPa/}^\circ\text{KMA}$ basınç artış hızına ulaşıldığında motor sert çalışır (Safgönül vd 1999).

3.2.3. Difüzyon kontrollü yanma

Dizel motordaki yanmanın üçüncü safhasıdır. Kontrolsüz yanmadaki ani basınç artışından sonra difüzyon kontrollü yanma bölümü başlar. Dizel yanmanın normal olarak yakıt-hava karışımı tarafından kontrol edildiği kabul edilir. Dizel motorda yakıtın yanması tek bir noktadan değil birden fazla noktadan gerçekleşir (Safgönül vd 1999).

Ani yanma gerçekleştiği zaman, hazırlanmış olan yakıt ani olarak yanar ve silindir içinde vuruntuya neden olan ani basınç yükselmesine neden olur. Arta kalan yakıt ise havayla karışma oranı tarafından belirlenen bir oranda yanar. Dizel yanma prosesinin heterojenliği, bazı avantajlar sağlasa da bunun yanında bazı dezavantajlarda getirmektedir. Yakıt hava içine püskürtüldüğü zaman, bir kısmı zayıf yanabilirlik limitinin ötesinde, yanmaya fırsat bulamadan önce kaçar. Bu yakıt yanmamış hidrokarbon olarak adlandırılır. Tutuşma gecikmesi arttığı zaman, yakıt daha çok karışmak için daha fazla zaman bulacak ve hidrokarbon emisyonları artacaktır (Challen ve Baranescu 1999).

İsin büyük kısmı egzoz valfi açılmadan önce oksitlenirken, bir kısmı kalacak ve silindirden dışarı atılacaktır. Genişleme strokunun sonlarına doğru ve egzoz sisteminde yüksek molekül ağırlıklı hidrokarbon ve sülfatları (özellikle sülfürik asit ve hidratlarını) toplayacaktır. Bunlar partikül madde olarak adlandırılmıştır. Hava-yakıt karışımı işlemini hızlandırmak yüksek sıcaklıktaki zengin bölgede bulunan yakıt miktarını ve isi azaltacaktır. İsin azaltılması daha yüksek enjeksiyon basınçları ve daha fazla hava girdabı seviyeleriyle sağlanabilir. Bununla birlikte daha hızlı karışım ve yanmanın yan ürünü daha yüksek azot oksit (NO_x) seviyeleridir. Genel olarak, partikülü azaltan motor

dizaynı veya çalışma koşulları NO_x miktarını arttırmaktadır (Challen ve Baranescu 1999).

3.2.4. Art yanma

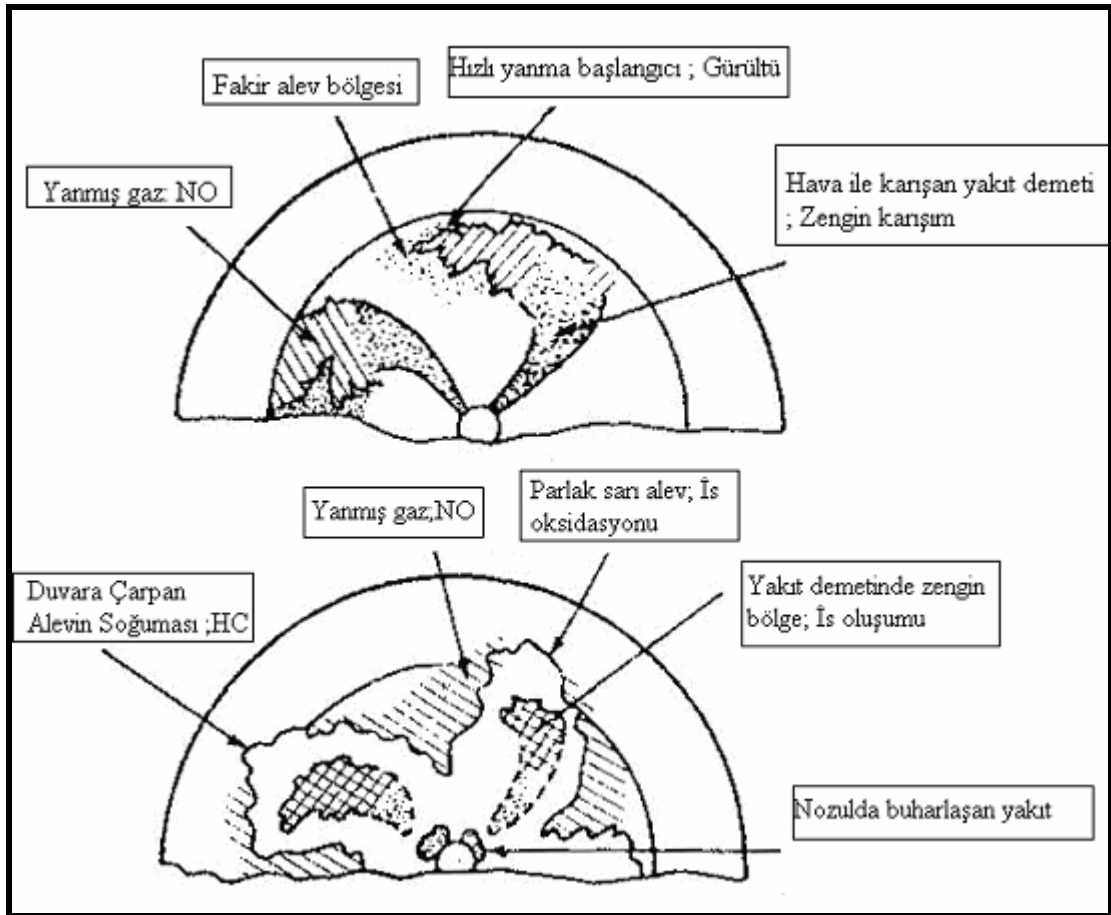
Bu safha silindir içinde maksimum sıcaklığa ulaşıldıktan sonra başlar. Difüzyon kontrollü yanmada olduğu gibi bu bölümde de difüzyon hızı ve karışım oluşma hızı yanma hızını kontrol eden parametrelerdir. Bu bölümde önceki safhalarda yanmaya fırsat bulamamış olan yakıtın bir kısmı da oksijen buldukça yanmaya devam eder.

3.3. Dizel Motorlarda Emisyonlar

Buji-ateşlemeli ve dizel motorlar hava kirliliğinin ana nedenlerinden biridir. Oluşan emisyonlar küresel ısınmaya, asit yağmurlarına, ise, çeşitli kokulara ve solunum ve diğer sağlık problemlerine neden olur. Bu emisyonların ana nedeni eksik yanma ve azotun parçalanması gibi nedenlerdir (Pulkrabek 1997).

Dizel motorlarda yakıt silindir içine yanma başlamadan hemen önce enjekte edilir, bundan dolayı çevrim içindeki kritik noktaların çoğunda yakıt dağılımı düzgün değildir. Şekil 3.4'de yakıt püskürtmesinin çeşitli bölümleri ve girdaplı bir doğrudan püskürtmeli motorda ön karışım ve karışım kontrollü yanma bölümleri için is , yanmamış HC ve NO oluşumunda alev etkisini gösterilmektedir.

Azot oksitler yüksek sıcaklıkta yanmamış gaz bölgelerinde oluşmaktadır. is yanmış gazlarla karıştırılarak ısıtılan yakıt buharının bulunduğu yerde, alev bölgesinin içinde, yakıt demetinin çekirdeğinde zengin yanmamış yakıt içeren bölgede oluşur. is daha sonra alev bölgesinde yanmamış oksijenle temas ettiğinde oksitlenir ve alevin sarı ışıldaayan karakterini oluşturur. Hidrokarbonlar ve aldehitler alevin duvarlar tarafından söndürüldüğü yerde ve havayla girişin seyreltmesinin sonucu yanmanın diğer bir kademesine geçmesini ve tamamlanmasını engelleyen yerde oluşurlar (Heywood 1988).



Şekil 3.4 Dizel motorlarda difüzyon kontrollü yanma sırasında emisyonların oluşumu (Heywood 1988)

3.3.1. NO_x emisyonları ve oluşum mekanizması

Azot oksitler (NO_x) yanma odasında yanma işlemi sürecinde atomik oksijen ve azotun reaksiyonuna bağlı olarak oluşurlar. NO_x oluşturan reaksiyonlar sıcaklığa çok bağlıdır. Bundan dolayı NO_x emisyonları motor yük değeriyle orantılıdır ve NO_x emisyonları motor ilk çalışmasında ve ısınma sırasında bağlı olarak düşüktür.

Motor egzoz gazları 2000 ppm kadar azot oksit içerebilirler. Bunlardan büyük kısmını azot oksit (NO), az miktarda azot dioksit (NO_2) ve diğer azot oksit bileşikleri oluşturmaktadır. Bunların hepsi birlikte NO_x olarak gruplandırılır. Bununla birlikte, yaygın kullanımda NO ve NO_2 gazlarının toplamı NO_x emisyonları olarak adlandırılmaktadır.

NO oluşumu için üç mekanizma tanımlanmıştır; Zeldovich veya ısı mekanizma, Fenimore veya ani mekanizma ve yakıt NO_x mekanizması.

Isıl veya Zeldovich, NO oluşum mekanizması: Azot mono oksit (NO) ve azot di oksit (NO₂), NO_x emisyonları olarak birlikte gruplandırılırsalar da, azot mono oksit (NO) motor silindiri içinde üretilen baskın azot oksittir. NO'nun ana kaynağı atmosferik hava içindeki moleküler azotun oksidasyonudur.

Moleküler azottan NO oluşumu 3.1, 3.2 ve 3.3 no'lu denklemlerde verilmiştir.



3.1 no'lu reaksiyon NO'da oran limitli reaksiyondur. Çünkü aktivasyon enerjisi (320 kJ/mol) en yüksektir. Zeldovich mekanizmaları için birinci reaksiyonun yüksek aktivasyon enerjisi gereksiniminden ve O₂'nin ayrılma ihtiyacından dolayı sıcaklık çok önemlidir (Tat 2003).

NO hem alev önünde hem de alev sonrası gazlarda oluşabilir. Motorlarda, yanma yüksek sıcaklıkta gerçekleşir, bu yüzden alev reaksiyon bölgesi oldukça incedir (yaklaşık 0.1 mm) ve bu bölgede kalma zamanı kısadır. Ayrıca, silindir basıncı yanma prosesinin büyük kısmı boyunca yükselir, bu yüzden yanma prosesinde erken oluşan yanmış gazlar yanmadan sonraki birden ulaşabilecekleri sıcaklıktan daha yüksek sıcaklığa sıkıştırılırlar. Böylece, alev sonrası gazlar genelde her zaman alev öncesi oluşan NO' lara üstündür.

Ani veya Fenimore, NO oluşum mekanizması: Ani denilmesinin nedeni yakıtın zengin karışım olduğu yerin önündeki yanmada NO'nun çabuk oluşmasıdır. Bu mekanizma 3.4, 3.5 ve 3.6 no'lu denklemlerde görülmektedir.





İkinci reaksiyonda üretilen N atomunun ilk reaksiyon boyunca NO formunu alabileceğini düşünülmektedir. Ani NO'un sadece hidrokarbon yanmalarında görüldüğü, çok zayıf şekilde sıcaklığa bağlı olduğu ve eşdeğerlilik oranı arttıkça arttığı tespit edilmiştir (Tat 2003).

Kimyasal denge ilişkileri ile tipik alev sıcaklığında yanmış gazlar için NO₂/NO oranının ihmal edilebilir derecede küçük olduğu söylenebilir. Dizel motorda NO₂ toplam azot oksit emisyonlarının %10-30'u arasında bir değer alır. Alev bölgesinde oluşan NO çok çabuk NO₂ ye dönüştürülebilir, 3.7 no'lu denklemde NO₂ dönüşüm mekanizması görülmektedir (Tat 2003).



Sonradan, bu NO₂ nin NO ya dönüşmesi 3.8 no'lu denklemde gösterilmiştir.



Alevde NO₂ oluşumu soğuk akışkanla karıştırılarak bastırılabilir. Bu açıklama NO₂/NO oranının dizel motorlarda en yüksek olduğu değer, NO dönüşümünü bastırarak soğutma bölgelerinin yaygın olduğu hafif yüklerdir bilgisiyle örtüşmektedir.

Yakıttan kaynaklanan NO: Birçok ağır yakıt organik azot bileşikleri içerebilirler. Bu azot, NO oluşturmak için reaksiyon gösterebilir. Yakıttan kaynaklanan NO bölgesel sıcaklığa, stokiyometriye ve yakıt-hava karışımındaki azot bileşiklerinin ilk seviyesine bağlıdır (Prior vd. 2005). Yakıtta bulunan HCN, NH₃, NH veya CN gibi bileşiklerin bulunması sonucu bunlar NO_x formuna oksitlenebilirler (Fernando vd 2006).

Dizel motorlarda yakıtın silindir içine enjekte edilmesi yanmadan hemen önce gerçekleşir ve yanma sırasındaki yakıtın düzgün olmayan dağılımı, düzgün olmayan yanmış gaz sıcaklığı ve kompozisyonuna neden olur. Yanma boyunca tutuşma gecikmesinin hemen akabindeki "ön karışım" ya da kontrolsüz dizel yanma safhası, yaklaşık stokiyometrik kompozisyona ayrılan hava-yakıt karışımı, tutuşma gecikmesine

ve alev yayılmasına bağlı olarak gerekleŒir. Difüzyon kontrollü yanma bölümü boyunca, karışım yanması stokiyometriğe yakın olacaktır (alev yapısı gürültülü, kararsız ve difüzyon alevi Œeklinindedir). Karışım bağlı değişimlerde, sıcaklık silindir basıncının yükselmesi ve alçılmasıyla oluşan sıkıştırma ve genişlemeye bağlı olarak deęiŒecektir. Tipik motorlarda yanmış gazların yüksek sıcaklık ve yüksek basıncında NO oluşumu için kritik eşdeğerlik oranı stokiyometrik değere yakındır.

Kritik zaman periyodu, silindir basıncının maksimum değere ulaşması ile yanmış gaz sıcaklığının maksimum değere ulaştığı zaman aralığıdır. Yanma ilerlerken ve silindir basıncı yükselirken, yüksek sıcaklığa ulaşılması NO oluşum oranını arttırdığından özellikle önemlidir. Yanmış gaz sıcaklığı silindir gazları genişlerken düşer. Genişlemeye ve yüksek-sıcaklık gazlarıyla hava veya soğutucu gaz arasındaki karışım bağlı olarak düşen sıcaklık NO_x kimyasını dondurur. Bu ikinci etki olan (sadece dizel motorda olan) donma dizelde buji ateşlemeden çok daha çabuk olmakta ve çok daha az NO oluşumu görülmekte olduğu anlamına gelir.

Püskürtme zamanının ve yükün değiştirilerek yapıldığı çalışmalarda NO oluşumunun büyük çoğunluğunun, yanma başlangıcını izleyen 20 KMA içerisinde olduğu tespit edilmiştir. Püskürtme zamanı geciktirilirse yanma da gecikir. Ulaşılan maksimum sıcaklık değeri düştükce NO konsantrasyonu da azalır. Yüksek yükte, daha yüksek maksimum basınçlar, dolayısıyla yüksek sıcaklıklar, yanmış gaz stokiyometriğine yakın daha geniş bölgeler NO seviyelerini yükseltmektedir. NO seviyeleri düşen eşdeğerlik oranıyla düşmüştür (Heywood 1988).

Setan sayısının NO_x emisyonlarına etkisi: Yakıtın setan sayısı yakıtta bulunan parafinik hidrokaronlarla artar. Artan setan sayısıyla tutuşma gecikmesi azalır. Bu da motorun kararlı ve düzgün çalışmasını sağlar. Setan sayısı aynı zamanda yanma verimini de etkilemektedir. Eğer setan sayısı normal değerinden çok daha yüksek ise bu tutuşma gecikmesinin, yanma odasında yakıtın yayılması için gereken zamandan daha kısa zaman kalacağı anlamına gelir. Bu Œekilde motorun yanma verimi düşecek ve is miktarı artacaktır. Setan sayısının normal değerden düşük olması durumunda motorun çalışması zorlaşacak ve geç ve ani tutuşmayla dizel vuruntusuna neden olacaktır. Genel olarak setan sayısının artması NO_x emisyonlarının azalmasına sebep olmaktadır (İçingür ve Altıparmak 2003).

Enjeksiyon zamanının NO_x emisyonlarına etkisi: Enjeksiyon zamanını geciktirerek alev sıcaklığının düşürülmesiyle NO_x emisyonları azaltılabilir. Artan enjeksiyon zamanı daha yüksek NO_x'a sebep olur. Çünkü yanma erken başlar ve bundan dolayı silindir içindeki karışım yanmasının zaman olarak devam süresi artar. Bu da NO_x mekanizmalarının gerçekleşmesine izin verir.

3.3.2. Partikül madde emisyonları

Dizel motor partikülleri çoğunlukla bazı organik bileşiklerin emilmiş olduğu yanma yapılı karbonlu maddeler içerirler. Partiküllerin büyük bir kısmı eksik yanma sonucu oluşurlar. Partikülün kompozisyonu motor egzozundaki koşullara ve partikül tutucu sisteme bağlıdır.

Doğrudan püskürtmeli dizel motorlarda, en yüksek partikül konsantrasyonu ortalama bölgesel eşdeğerlik oranının çok yüksek olduğu yakıt demetinin çekirdeğinde görülmüştür. İis konsantrasyonu yanma başladıktan hemen sonra hızlı bir şekilde artar. Partikül konsantrasyonu enjektör deliğine yakın, yakıt demeti ekseninde önemli derecede yüksektir. Yakıt demeti çekirdeğinden uzaklaştıkça is konsantrasyonu düşer (Heywood 1988).

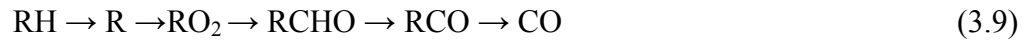
3.3.3. SO₂ emisyonları

SO₂ emisyonları yakıtta bulunan kükürttten kaynaklanmaktadır. Yakıttaki kükürtün oksijenle reaksiyonu sonucu kükürt dioksit oluşur. Kükürt dioksitin suyla reaksiyona girmesi sonucu sülfirik asit oluşur. Egzozda sülfirik asitinin bulunması malzemede aşınmaya ve korozyona neden olur. SO₂ emisyonları ayrıca doğada asit yağmurlarına neden olmaktadır. Dizel yakıtta kükürt oranını azaltma yönünde çalışmalar yapılmaktadır. Türkiye piyasasında satılan düşük kükürtlü dizel yakıtlar da 50 ppm'den daha az kükürt içermektedir.

3.3.4. Karbon monoksit emisyonları

CO emisyonu eksik ya da zayıf yanma sonucu oluşur. Düşük gaz sıcaklığı veya ortamda yeterli oksijenin olmaması eksik yanmaya neden olur. Bu da CO emisyonlarını arttırmaktadır. İçten yanmalı motorlardaki CO emisyonları hava-yakıt eşdeğerlik oranıyla kontrol edilir. Zengin yakıt karışımları için egzozdaki CO konsantrasyonu artan eşdeğerlik oranıyla artar, çünkü giren yakıt miktarı artmaktadır. Dizel motorlar stokiometrinin zayıf tarafında çalıştıkları için CO emisyonları çok yüksek değildir.

CO oluşum mekanizması 3.9 no'lu denklemdeki gibi özetlenebilir;



burada, R radikal hidrokarbondur. Yanma prosesinde bu yolla oluşan CO oksitlenir ve düşük oranlarda CO₂ dönüşür. CO oksitlenme reaksiyonu 3.10 no'lu denklemde verilmiştir.



3.3.5. Hidrokarbon emisyonları

Hidrokarbonlar veya daha uygun bir biçimde organik emisyonlar hidrokarbon yakıtın eksik yanması sonucu oluşur. Toplam hidrokarbon emisyonu yanma verimi için kullanılabilir ölçü olsa da, kirli emisyonların önemli bir göstergesi değildir. Motor egzoz gazları çok geniş nitelikte hidrokarbon bileşikleri içerirler. Hidrokarbon bileşikleri oksitlenme potansiyellerine dayanılarak reaktif ve reaktif olmayan olarak ikiye ayrılmıştır. Yakıt kompozisyonu, organik emisyon kompozisyonunu ve miktarını önemli derecede etkiler. Yakıt yüksek oranda aromatik ve olefinler içerirse daha fazla reaktif hidrokarbon üretirler (Heywood 1988). Dizel yakıttaki bileşikler benzinden ortalama olarak daha yüksek moleküler ağırlıklıdır. Bu yüzden daha yüksek kaynama ve yoğunlaşma sıcaklığına sahiptirler. Bu da yanma boyunca katı karbon islerinin yüzeyinde yoğunlaşacak bazı hidrokarbon partiküllerinin oluşmasına neden olur (Pulkrabek 1997).

Normal bir yanma prosesinde yakıtın yanmadan kaçabilmesi için iki öncelikli yol bulunmaktadır: birincisi hava-yakıt karışımının tutuşma için veya yanma odası içinde alevin ilerlemesini destekleyemeyecek kadar çok zayıf olması ve ikinci olarak yanma odası içinde alevin ilerlemesini destekleyemeyecek kadar gereğinden fazla zengin olması. Hidrokarbonlar yanmamış karışıma veya oksidasyon prosesinin bastırılmasına bağlı olarak yanmadan kalırlar.

Tutuşma gecikmesi periyodu bittikten sonra enjekte edilen yakıt için, yakıtın veya yakıt prolizlerinin ürünlerinin hızlı oksidasyonu tamamlanmış yanmayı sağlarlar. Yakıtın veya yakıt prolizlerinin havayla yavaş karışması aşırı zengin karışıma neden olacaktır. Bu da yanma reaksiyonlarını bastırarak eksik yanmaya ve dolayısıyla egsozda yanmamış yakıtı neden olabilir (Heywood 1988).

3.4. Biyodizel Kullanımının NO_x ve Diğer Emisyonlara Etkilerinin İncelenmesi

Lin vd (2007) atık kızartma yağından transesterifikasyon yöntemi ile ürettikleri biyodizelin %20, %50 ve %80 oranlarında dizel yakıtla karışımlarının dizel motordaki etkilerini incelemişlerdir. Çalışmada 2200cc, 4 zamanlı, su soğutmalı girdap odalı IDI dizel motor kullanılmıştır. Biyodizel karışımlarının dizel yakıtı göre CO ve SO₂ emisyonlarında düşmeye sebep olurken, NO_x emisyonlarının artışına neden olduğu tespit edilmiştir. B20 tüm dönme sayılarında en düşük CO emisyonuna sebep olmuştur. Tüm yakıtlarla NO_x emisyonlarının en yüksek seviyeye ulaştığı aralık 1800-2000 dev/dak aralığıdır. Karışımdaki biyodizel oranı arttıkça SO₂ emisyonunda azalma olduğu beklendiği gibi tespit edilmiştir.

Çanakçı (2007) soya yağı biyodizelini ve bu biyodizelin %20 oranında dizel yakıt ile karışımını bir John Deere 4276T, 4 silindir, 4 zamanlı DI motorda test etmiştir. Tüm testler boyunca hız 1400 dev/dak ve yükte tam yük olan 257.6 Nm de sabit tutulmuştur. Özgül yakıt tüketiminde B100 (%100 biyodizel) dizel No.2'ye göre %13.8 artış göstermiştir. Yakıt tüketimindeki bu artışın sebebi olarak biyodizelin ısı değeri dizel No.2'den %12 daha düşük olması gösterilmektedir. Isıl değeri düşük olması nedeniyle yanma odasına daha çok miktarda biyodizel enjekte edilmesi gerekmektedir. CO emisyonu B20 ve B100 için Dizel No.2' ye göre daha düşük değerler göstermiştir. CO

emisyonlarının %100 biyodizel kullanımı ile %18.4 düşüş gösterdiği saptanmıştır. CO₂ emisyonunun %100 biyodizel kullanıldığında çok az (%0.5) artış gösterdiği tespit edilmiştir. Yanmamış HC değerinde ise B100 için Dizel No.2'ye göre düşüş %42.5 olarak saptanmıştır. NO_x emisyonları karşılaştırıldığında %100 biyodizel kullanımında dizel yakıt No.2'ye göre %11.2 artış gösterdiği görülmüştür. Bunun nedenleri arasında biyodizelin içerdiği oksijen miktarının dizel yakıtta göre daha fazla olması ile birlikte eşdeğerlilik oranının, yanma sıcaklığının ve zamanın da NO_x emisyonlarını etkilediği ifade edilmiştir. Biyodizelin içerdiği oksijen NO_x formasyonunun oluşması için ek bir kaynak oluşturmaktadır.

Sahoo vd (2007) yaptıkları çalışmada küçük boyutlu su soğutmalı, DI dizel motorda Hindistan'da yetiştirilen bir meyve olan "polanga" yağı biyodizel, dizel ve karışımlarını kullanmışlardır. NO_x emisyonları motor yüklemesinin doğrudan bir fonksiyonu olduğu, artan yüklemeye yanma odası sıcaklığının arttığı ve bununda NO_x emisyonlarını artırdığı ifade edilmiştir. Bununla birlikte birçok çalışmanın tersine biyodizel kullanımı ile NO_x emisyonlarında %4 civarında düşme olduğu belirtilmiştir. Bunun nedeni farklı motor geometrisi, sıkıştırma oranı, daha az reaksiyon zamanı ve sıcaklığından kaynaklanabileceği ile açıklanabileceği ifade edilmiştir. Biyodizelin kullanımı ile yanma odası sıcaklığının düşük olması daha düşük egzoz gazı sıcaklığı ile açıklanmıştır. Diğer emisyonlar da ölçülmüş olup biyodizelin içerdiği oksijenden dolayı daha iyi ve kararlı yanmaya bağlı olarak is, CO, HC ve CO₂ emisyonlarında biyodizel kullanımı ile dizel yakıtta göre biraz düşüş gösterdiği ortaya konulmuştur.

Labeckas ve Slaviskans (2006) deneylerinde %5, 10, 20 ve 35 oranlarında kanola yağı biyodizeli ve dizel yakıt karışımlarını incelemişlerdir. Çalışmalarında 4 zamanlı 4 silindirli doğal emişli DI motor kullanmışlardır. 1400, 1800 and 2200 dev/dak hızlarında özgül yakıt tüketimi ölçülmüştür. Özgül yakıt tüketimi biyodizelin ısı değerinin yaklaşık olarak dizelden % 12.5 az olmasından dolayı %18.7 - 23.2 arasında bir oranda arttığı tespit edilmiştir. NO emisyonunun ölçülmesinde kanola yağı biyodizeli için 1924-2066 pmm maksimum değerine ve dizel içinde 1823-1925 ppm maksimum değerine hafif yüklerde ulaşılmıştır. 1400 dev/dak gibi düşük hızlarda çalışıldığında minimum NO emisyonu B5 ile elde edilmiştir. Maksimum tork dönme sayısı olan 1800 dev/dak'da tüm yakıtlar dizel yakıttan daha yüksek NO emisyonu göstermişlerdir. 2000 dev/dak motor dönme sayısında NO_x emisyonları dizel yakıt ile

en yüksek değer 1983 ppm iken, B35 biyodizelde 2132 ppm olarak ölçülmüştür. CO ve is emisyonu ölçümlerinde biyodizel kullanılması durumunda dikkate alınacak düşüşler saptamışlardır.

Sendzikiene vd (2006) rafine kanola yağı biyodizeli, etanol ve dizel yakıt karışımlarını bir silindirli ön yanma odalı bir motorda test etmişlerdir. Karışıma etanol ilave ederek karışımın hem bulutlanma noktasını aşağıya çekmişler hemde oksijen oranını arttırmışlardır. Yakıtın oksijen içeriği yakıtın yanmasını ve dolayısıyla NO_x ve CO emisyonlarını önemli derecede etkilemektedir. Yapılan çalışmada oksijen miktarının artırılmasıyla NO_x emisyonunun azaldığı belirlenmiştir.

Nabi vd (2006) Doğu Hindistan'da üretilen bir meyve olan "neem" yağı biyodizeli ve dizel karışımlarını tek silindir su soğutmalı DI dizel motorda test etmişlerdir. Motor dönme sayısı 1000 dev/dak olarak ayarlanmış ve enjeksiyon zamanının NO_x üzerindeki etkisini görmek için farklı püskürtme avanslarında testler yapılmıştır. Bütün püskürtme avanslarında karışımlar, dizel yakıtı göre daha yüksek NO_x emisyonuna sebep olmuştur.

Puhan vd (2005) mahua yağı biyodizelini tek silindir dört zamanlı sabit hızlı, su soğutmalı DI dizel bir motorda test etmişlerdir. Yakıt tüketimi bakımından, biyodizelin yoğunluğunun dizel yakıttan fazla olması nedeniyle püskürtme pompası kütle bazında daha fazla yakıtı yanma odasına gönderdiği belirtilmiştir. NO_x emisyonları oksijen içeriğine, yanma sıcaklığına ve püskürtme karakteristiğine bağlı olarak değiştiiği, yakıt püskürtme özellikleri yakıt damlacık çapına, damla momentumuna ve havayla karışma derecesine ve hava içine girme oranına bağlı olduğu bu özelliklerden herhangi birisindeki değişikliğinin NO_x oluşumunu etkilediği ortaya konulmuştur. Yükleme arttıkça NO_x oluşumu artmakta ve maksimum yükte maksimum değerine ulaştığı tespit edilmiştir. Bununla birlikte yük olmadığı durumda NO_x emisyonunda yaklaşık %12 azalma ölçülmüştür.

Wyatt vd (2005) soya ve hayvansal yağlardan elde ettikleri biyodizeli Yanmar L100 tek silindir, dört zamanlı, doğal emişli, hava soğutmalı, DI dizel motorda 3200 dev/dak'da test etmişlerdir. Genelde hayvansal yağlardan elde edilen biyodizel

yakıtların, soya yağından elde edilen biyodizelden daha az NO_x oluşturduğu tespit edilmiştir.

Çanakçı vd (2006) yaptıkları çalışmada soya yağı ve ayçiçek yağı biyodizellerin dizel yakıtla karışımlarını kullanmışlardır. Testlerini John Deere 4276T, 4 silindri, 4 zamanlı, turbo DI dizel motorda, tam yükte ve 1400 dev/dak motor dönme sayılarında gerçekleştirmişlerdir. CO ve HC emisyonları artan biyodizel miktarıyla düşmüş, NO_x emisyonları ise artmıştır. Bu da biyodizeldeki oksijen miktarıyla ilişkilendirilmiştir. NO_x için diğer bir faktör egzoz gazı sıcaklığıdır.

Ramadhas vd (2005) kauçuk yağı biyodizelini dört zamanlı, DI doğal emişli, tek silindri, 5.5 kW güçte dizel motorda 1500 dev/dak ve değişik yüklerde test etmişlerdir. Kauçuk yağı biyodizeli kullanımıyla daha yüksek egzoz gazı sıcaklıkları elde edilmiş dolayısıyla bu da daha fazla NO_x üretimi için sebep olarak gösterilmiştir. Biyodizel kullanımı ile daha az is ve CO emisyonları elde edilmiştir. Biyodizel içerisinde yaklaşık olarak kütlece %11 oksijen ihtiva ettiğinden, yanmanın daha iyi olması sağlanarak daha az CO ve is oluşturduğu belirtilmiştir.

Ulusoy vd (2004) yaptıkları çalışmada Fiat Doblo 1.9 DS Lucas Epic DCU3F IDI dizel motorda, kızartma yağı biyodizelini test etmişlerdir. Biyodizel kullanımı ile dizel yakıtı göre %8.59 CO emisyonunda azalma, NO_x emisyonlarında %5.03 artış, HC emisyonunda %30.66 azalma ve partikül maddede de %63.33 azalma saptanmıştır.

Kalam vd (2003) hindistan cevizi yağı ve dizel yakıtla karışımlarını Isuzu 4FB1 4 silindir IDI dizel motorda 800–3200 dev/dak motor dönme sayıları arasında test etmişlerdir. HC, CO ve is artan hindistan cevizi yağı oranıyla azalmıştır, bu da oksijen içeriğinden kaynaklanan iyi yanma ile açıklanmıştır. %50 hindistancevizi karışımı ile maksimum %8.42 NO_x düşmesi ile birlikte %20 egzoz sıcaklığı düşüşü görülmüştür. 2000 dev/dak sabit dönme sayısında 10-100Nm yük aralığında NO_x %10 düşüş göstermiştir. Hindistan cevizinin düşük yanma sıcaklığı NO_x'taki düşüşün ana nedeni olarak belirtilmiştir.

Abu-Hamdeh (2003) dizel yakıtla yaptığı çalışmada tek silindir, doğal emişli, su soğutmalı DI dizel motor ve elektrik jeneratörlü dinamometre sistemini kullanmıştır.

Dizel motorlarda NO_x emisyonunu azaltma yöntemlerinden biri olarak egzoz gazı yeniden sirkülasyonu (EGR) yöntemini kullanılmıştır. NO_x ve partikül madde konsantrasyonları için üç EGR oranı (%30,40 ve 50) kullanılmıştır. Soğutulmuş EGR ile oluşan zayıf yanma oksijen konsantrasyonunu ve maksimum silindir sıcaklığını düşürerek NO_x üretiminin azalmasına neden olmuştur.

Krahl vd (2002) kanola yağı biyodizeli ile Farymann (Mannheim, Germany) motor tipi 18 D, hava soğutmalı 4.2 kW tek silindir dört zamanlı DI dizel motor ve Fendt traktör tipi 306 LSA DI dizel motorlarını kullanmışlardır. Yapılan çalışmalarda biyodizel kullanımı ile NO_x emisyonlarının arttığı tespit edilmiştir. Bunun da biyodizelin yüksek setan sayısından kaynaklandığı belirtilmiştir.

Altın vd. (2000), ham ayçiçeği yağı, soya yağı, pamuk yağı ve esterleri, rafine kanola, haşhaş, rafine mısır yağı ve esterlerini 4 zamanlı tek silindir DI dizel motorda testlere tabi tutmuşlardır. Yağ ve esterleri karşılaştırıldığında esterler ile de daha düşük CO emisyonları elde edilmiştir. Bunun sebebi de daha iyi atomizasyon kalitesi ve daha homojen karışım hazırlanması olarak gösterilmiştir. Bitkisel yağların kullanımı ile dizel yakıtına göre NO_x emisyonlarında azalma görülürken, esterlerin kullanımı ile dizel yakıtına göre daha yüksek NO_x emisyonları oluşmuştur. NO_x emisyonu maksimum yanma sıcaklığıyla alakalıdır. Bitkisel yağların yanma verimi ve maksimum yanma sıcaklığı daha az ve buna bağlı olarak NO_x emisyonları da daha azdır. Fakat bu durum yağların daha fazla is emisyonu oluşturmasına neden olmuştur. Ayrıca yağlardaki daha ağır hidrokarbon molekülleri de is emisyonunun artmasına sebep olmuştur.

Raheman va Ghadge (2007), tek silindirli, 4 zamanlı, su soğutmalı, 18:1 sıkıştırma oranlı Ricardo E6 motorda test etmek için mahua yağı biyodizelini ve dizel yakıtı karşılaştırmışlardır. %25, 50, 75 ve 100 değerlerinde yükleme ve ortalama 1500 dev/dak hızda testleri gerçekleştirmişlerdir. Yakıt tüketimi, tork ve egzoz gaz sıcaklık değerleri, CO, is ve NO_x emisyonları ölçülmüştür. Yakıt tüketimi mahua biyodizel kullanımında artmıştır. Her %20 biyodizel ilavesi için dizel yakıtına göre yakıt tüketimi artışları %4.3, %18.6, %19.6, %31.7 ve %41.4 olarak ölçülmüştür. Isıl verim artan biyodizel konsantrasyonu ile düşmüştür. Egzoz gazı sıcaklığı artan yükle beraber tüm yakıtlar için artış göstermiştir. Her %25 yük artışı için ortalama egzoz gazı sıcaklığı artışı %15 civarındadır. Bunun nedeni daha fazla güç için daha fazla yakıtı ihtiyaç duyulmasıdır.

Egzoz gazı sıcaklığı artan biyodizel konsantrasyonu ile artmıştır. B20, B40, B60, B80 ve B100 için artışlar sırasıyla %6, %10, %12, %14 ve %16' dır. Is emisyonu biyodizel ve karışımlarında dizel yakıtı göre daha azdır. B20 ve B100 için dizel yakıtı göre is'teki düşüş sırasıyla %46 ve %5'tir. Bunun nedeni biyodizelin zincirlerinde içerdiği yanmayı kolaylaştıran oksijen içeriğidir. CO emisyonu dizel yakıtı göre biyodizelde daha düşüktür. Bunun nedeni dizel yakıtı göre daha iyi yanma olarak gösterilmektedir. NO_x emisyonları dizel yakıtı göre karşılaştırıldığında yaklaşık %6 artış göstermiştir. Bunun nedeni daha yüksek egzoz gaz sıcaklığı ve NO_x formasyonunun oluşmasına katkıda bulunan biyodizelin oksijen içeriğidir. Genel olarak NO_x emisyonu değişen yükte doğrusal değişim göstermektedir. Yük arttığında, yanma odasındaki gaz sıcaklığında artışa neden olan yakıt-hava karışımı artar ve böylece sıcaklığa duyarlı olan NO_x oluşumu da artar. NO_x emisyonları sıcaklıkla doğru orantılı ve CO ve is ile ters orantılı olarak tespit edilmiştir.

Tsolakis vd (2007), testlerinde kanola yağı biyodizeli ve dizel yakıtı karışımlarını kullanmışlardır. Kullandıkları motor tipi Lister-Petter TR1 olup 773 cm³ hacimli tek silindirli, doğal emişli, hava soğutmalı DI dizel motordur. Sıkıştırma oranı 15.5:1'dir. Farklı karışımlar iki farklı koşulda test edilmişlerdir. Motor dönme sayısı 1500 dev/dak sabit tutularak 20 Nm ve 30 Nm tork üretecek şekilde testler yapılmıştır. Kanola biyodizelinin yakıt içindeki yüzdesi arttıkça CO, is ve HC düşerken her iki durum içinde NO_x emisyonları artmıştır. Biyodizel miktarının artmasıyla artan yakıt tüketimi biyodizelin ısı değeri (37 MJ/kg) dizele göre (42.6 MJ/kg) düşük olmasından dolayıdır. Yakıt karışımındaki biyodizel miktarının artması, tutuşma gecikmesini düşürür, ön karışımında daha fazla yakıtın yanmasını sağlar, yanma başlangıcını erken bir kademeye öter ve böylece silindir içindeki sıcaklık dizel yakıtı karşılaştırıldığında artar. Daha kısa tutuşma gecikmesi ve daha fazla yakıt miktarın ön karışım yanmasına geçirilmesi silindir basıncını ve de sıcaklığını artırır. NO_x oluşum oranı alev sıcaklığının bir fonksiyonudur ki bu da silindir basıncı ve dolayısıyla sıcaklığıyla yakından ilişkilidir. Ek olarak biyodizelin dizele oranla daha yüksek viskozitesi, aynı püskürtme koşullarında daha çok yakıtın gönderilmesini gerektirir. Yanma çok daha kısa zamanda gerçekleşir ve ısı transferi için daha az zaman kalır. Bunlardan dolayı biyodizelde NO_x emisyonları dizel yakıtı göre daha fazladır. Biyodizel içindeki oksijen bölgesel zengin yakıt yanma alanlarında dahi daha iyi yakıt oksidasyonuna izin verir ve bu da is emisyonunu azaltır. CO ve HC emisyonlarındaki azalmanın sebebi olarak

çeşitli sebepler gösterilmiştir. Fakat açıkça belli olan neden ise püskürtme zamanının ilerlemesidir. Bütün yakıtlar için EGR eklenmesi is, HC ve CO emisyonlarını arttırırken NO_x'ta azalmaya neden olmaktadır. %20 EGR ile NO_x emisyonları dizel yakıtunkine çok yaklaşmış ve is emisyonunda düşük değerlerde korunmuştur. EGR kullanılmasıyla yakıt tüketimi artmış verim düşmüştür. Daha yüksek NO_x düşüşleri için bir sebep de biyodizel ve dizel yakıtın yanmalarından elde edilen motor egzoz gazlarının farklı kompozisyonlarıdır.

Wu vd (2007), lokanta ve hızlı gıda satış yerlerinden aldıkları atık kızartma yağları transesterifikasyonla biyodizele dönüştürüp 4 silindirli, 4 zamanlı 2200 cc ön yanma odalı dizel motorda test etmişlerdir. Atık yağ biyodizeli üretiminde litre başına 3 farklı miktarda NaOH kullanmışlardır; 4.3 g(B01), 4.8 g(B02), 4.1 g(B03). B01 için 900-2200 dev/dak hız aralığında, diğerleri için 1000-2000 dev/dak hız aralığında testler yapılmıştır. B01 bütün hızlar için en yüksek CO emisyonunu vermiştir. B02 ve B03 1400 dev/dak'den yüksek hızlarda dizel yakıttan daha az CO emisyonu vermiştir. 1000 dev/dak'de B01 en yüksek HC emisyonunu verirken, B02 en düşük HC emisyonu göstermiştir. 1000 dev/dak dışındaki hızlarda bütün yakıtlar yaklaşık olarak aynı HC emisyonu göstermişlerdir. 1200 dev/dak hızda dizel yakıt en yüksek HC emisyonu üretmiştir. Biyodizel yakıtlar 1000 dev/dak'den yüksek hızlarda dizel yakıtına göre daha yüksek NO_x emisyonları üretmişlerdir.

Usta vd (2005), yaptıkları çalışmada fındık sabun stoğu ve atık yağı biyodizellerini dört zamanlı, dört silindirli, turbo şarjlı, ön yanma odalı dizel motorda test etmişlerdir. Fındık sabun stoğu yaklaşık %40-45 serbest yağ asidi içermektedir. Bunu düşürmek için sabun stoğuna atık ayçiçeği yağı ilavesi yapılmıştır. Böylece karışımın serbest yağ asitliği %20 civarlarına çekilmiştir. Testlerde 5 farklı yakıt kullanılmıştır. Bunlar dizel yakıt No.2 ve hacimce %5, %10, %15, %17,5 ve %25 biyodizel içeren dizel yakıt No.2-biyodizel karışımlarıdır. Testler motorun farklı yük (%100, %75 ve %50) ve farklı dönme sayılarında (3000, 2500, 2200, 2000 ve 1500 dev/dak) gerçekleştirilmiştir. Motor gücü biyodizel oranına bağlı olarak değişmekle birlikte, %17.5 oranında biyodizel ilavesinin en iyi güç ve ısı verimi verdiği tespit edilmiştir. NO_x emisyonu tüm yüklerde dizel yakıttan daha fazla bulunmuştur. Daha yüksek yanma sıcaklığı ve yakıttaki oksijenin varlığı NO_x emisyonlarını özellikle tam yüklemeye de arttırmıştır. Tam yüklemedeki daha yüksek egzoz gaz sıcaklığı NO_x oluşumunu desteklemektedir.

Sonuçlarda tam yükteki artışın %3-6 olduğu görülmüştür. NO_x emisyonunu etkileyen üç temel faktör vardır; oksijen konsantrasyonu, yanma sıcaklığı ve zamanı. Kısmi yüklerde oksijen konsantrasyonu yüksek olmasına rağmen, yanma sıcaklığı ve zamanı düşer. Bu da düşük NO_x emisyonu oluşturur. Ayrıca hava kaynaklı dış oksijenin NO_x üretiminde yakıt bünyesindeki oksijenden daha az etkili olduğu bilinmektedir.

Karabektas vd (2007), deneylerini tek silindirli, dört zamanlı, doğal emişli, sıkıştırma oranı 18:1 olan dizel motorda gerçekleştirmişlerdir. Testler dizel ve ham pamuk yağı biyodizelin 30, 60, 90 ve 120 °C'ye ısıtılmasıyla dört farklı şekilde yapılmıştır. Motor 1800 ve 3200 dev/dak hızlarında çalıştırılmıştır. Biyodizelin ısı değeri dizelinkinden %13 daha düşük ve viskozite ve yoğunluğu daha yüksektir. Bu özellikleri egzoz emisyon ve motor performans değerlerini etkilemektedir. Ayrıca biyodizelin yüksek parlama noktası onu taşıma için uygun bir yakıt haline getirmektedir. Biyodizelin yoğunluğu ve kinematik viskozitesi yapılan ön ısıtma ile düşürülmüştür. Yapılan çalışmada en yüksek güç değerleri biyodizel için 90 ve 120 °C'ye ısıtılan numunelerde elde edilmiştir. Bu güç değeri dizelden sırasıyla %1.92 ve %7.59 daha düşüktür. Ön ısıtma ile biyodizelin yoğunluğu ve viskozitesi düşürülmüş ve bu da yakıt atomizasyon ve yanma karakterini iyileştirmiştir. 120°C'a çıkarılan biyodizelin viskozitesi keskin bir şekilde düşmüş ve bu da enjektör ve yakıt pompasında sızıntılara neden olmuştur. Termal verim olarak dizel yakıtla karşılaştırıldığında biyodizelin 4 numunesi de dizel yakıttan daha yüksek çıkmıştır. Ortalama olarak %3-14 arasında bir artış söz konusudur. Bu artışa sebep olarak ısıtılan biyodizelin viskozite ve yoğunluğunun düşmesiyle yanmadaki iyileşme gösterilebilir. CO emisyonları biyodizelde dizel yakıttan daha az elde edilmiştir. Biyodizelin içerdiği %10 oksijen içeriği ile viskozite ve yoğunluk yanma ve emisyon değerlerini etkilemektedir. Biyodizelin içerdiği oksijen yanma sırasında yakıt içindeki karbonun oksitlenmesini sağlar ve daha düşük CO emisyonlarını sağlar. Bununla birlikte ısıtma ile biyodizelin viskozitesi düşer ve biyodizelin silindir içindeki oksitlenmesini geliştirir. Böylelikle tamamlanmamış yanmadan kaynaklanan yüksek CO emisyonları ön ısıtma uygulayarak düşürülebilir. Biyodizelde elde edilen CO emisyonları dizel yakıttan ortalama %14.40-45.66 daha düşük çıkmıştır. Biyodizel NO_x emisyonları genel olarak dizel yakıt oranla tüm motor hızlarında daha yüksek değerler vermiştir. Biyodizel kullanımında NO_x emisyonlarının artışı yaklaşık olarak %11.21-39.1 olarak bulunmuştur. Maksimum NO_x değeri 90 °C'ye ısıtılan biyodizelden elde edilmiştir. Daha yüksek motor hızları dizel

yakıtla biyodizel arasındaki NO_x emisyon farkını arttırmaktadır. NO_x 'taki bu artış geliştirilen yakıt sprey karakteristiğine, biyodizelin içerdiği oksijene bağlı olarak daha iyi yanma ve silindir içindeki daha yüksek sıcaklık olarak gösterilmiştir.

Biyodizel kullanımı ile NO_x emisyonları ile ilgili literatürde farklı açıklamalar da bulunmaktadır. Biyodizelin iyot sayısı (yani çift bağ sayısı) arttıkça NO_x 'ta artmaktadır. Doymamışlık (çift bağlar) durumu radikallerin oluşumu için karbon-karbon tek bağlarından daha hassastır. Yanma sırasında serbest radikallerin sıkıştırılması NO_x emisyonlarını azaltabilirler. Antioksidantlar da serbest radikallerin sıkıştırılması için birer araçlardır (Hess vd 2005). NO_x emisyonlarının azaltılmasında en genel olarak kullanılan antioksidant tert-bütül hidrokinon (TBHQ)'dur. Ayrıca antioksidantların kullanılması yakıtın depolanması sırasında oksidasyona karşı da iyi hale getirirler. Diğer yöntemlere oranla da daha az maliyet getirirler. Çeşitli antioksidant çeşitleri bulunmaktadır. NO_x emisyonlarını azaltmakta kullanılan en genel çeşidi zincir-kırıcı antioksidantlardır. Bu antioksidantlar hidrojen atomlarını radikalleri yok etmesi için destekleyerek radikallerin yayılma reaksiyonlarını engelleyip oksidasyona engel olurlar. Aynı şekilde NO oluşum reaksiyonlarını da engellerler. Hidroksiyonisol (BHA), hidroksitoluen (BHT) ve hidrokinon (TBHQ) genel olarak kullanılan çeşitli antioksidantlardır (Hess vd 2005).

4. NO_x EMİSYONLARI AZALTMA TEKNİKLERİ

NO_x emisyonları azaltma teknikleri birincil ve ikincil metodlar olarak iki kısma ayrılabilir. Birincil metodlar NO_x emisyonlarını motorda kaynağında azaltmak üzere yapılmaktadır. Bunlar motorda iyileştirme veya değişiklikler ya da soğutma esasına dayalı teknolojilerdir. İkincil metodlar ise NO_x emisyonlarını egzoz gazlarında düşürmektir. Yani NO_x emisyonu oluştuktan sonra düşürme yollarıdır (Prior vd 2005).

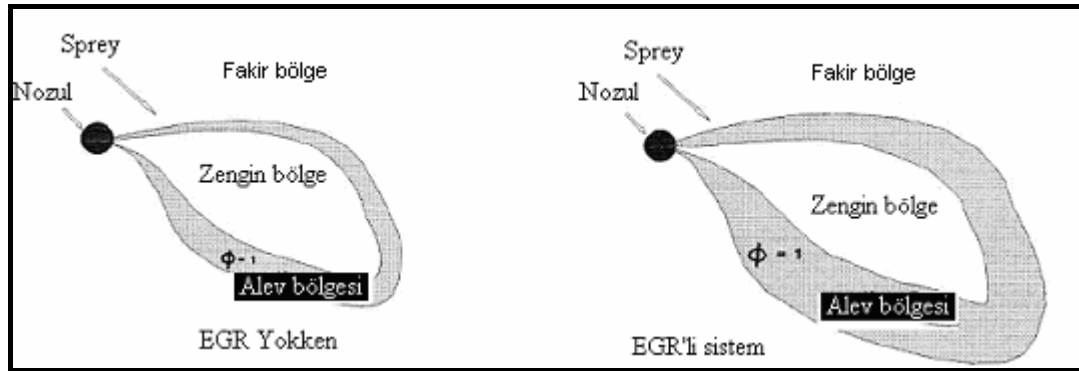
NO_x emisyonları oluştuktan sonra azaltmak için kullanılan yöntemler egzoz gazı yeniden sirkülasyonu (EGR), seçici katalitik indirgeme ve katalitik konvertörlerdir. Egzoz gazı yeniden sirkülasyonu (EGR) uygulanarak yanma odası sıcaklığı düşürülmektedir. Bu sistemde egzoz gazının bir kısmı (yaklaşık %10-25) taze hava ile birlikte yeniden dolgu olarak emme kısmına geri gönderilmektedir. Egzoz gazları yanma odasında reaksiyona girmez, sadece sıcaklığı absorbe ederek sıcaklığı düşürürler. Bundan dolayı, güçte bir miktar düşüş ve NO_x emisyonlarında azalma olur.

NO_x emisyonları azaltmanın bir başka yöntemi ise üç-nokta konvertör kullanmaktır. Katalitik konvertör NO_x'i N₂'ye, CO'ü CO₂'e çevirir. Katalitik konvertörler en iyi stokiyometrik hava-yakıt oranında etkili olurlar. NO_x azaltmanın bir başka yolu ise seçici katalitik indirgeme kullanmaktır (SCR). SCR egzoz gazlarının 260-650 °C olduğunda kullanılabilir ve SCR ile NO_x emisyonlarında önemli düşüşler sağlanabilmektedir.

NO_x emisyonları oluşmadan yanma odası sıcaklığını düşürerek, NO_x azaltma yöntemleri arasında doğrudan su püskürtülmesi, yakıt-su karışımı püskürtülmesi ve giriş havasının nemlendirilmesi sayılabilir. Doğrudan su püskürtme ile sıcaklık düşmekte ve NO_x emisyonları azalmaktadır. Karışım yakıt veya yakıt-su emülsiyonları da NO_x emisyonlarında oldukça iyi düşüşler sağlamaktadır. Bu yöntemde motor dizaynında bir değişikliğe gerek yoktur. Fakat yakıtın suyla emülsiyonu sonucu yağlayıcılık özelliği azalacağından dolayı püskürtme sisteminde istenmeyen hasarların oluşabileceği öngörülmektedir. Giriş havasının nemlendirilmesi ile yanma odası sıcaklığının düşürülmesi esasına dayanan nemli hava motorları ile NO_x emisyonlarında önemli azalmalar elde edilmiştir (Prior vd 2005).

4.1. Egzoz Gazı Yeniden Sirkülasyonu (EGR)

Egzoz gazı yeniden sirkülasyonu NO_x ve isi azaltmakta kullanılmaktadır. Bu tip sistemlerin motorda uygulanabilmesi için motor çalışmasını etkileyen parametrelerin iyi ayarlanması gerekmektedir. Burada önemli bir parametre yeniden sirküle edilen egzoz gazı sıcaklığıdır. Genel olarak EGR dizel motordaki yanmayı üç şekilde etkiler; termal, kimyasal ve seyreltme. Termal etki hacimsel verimi etkileyen içerideki dolgunun sıcaklığının yükselmesiyle, CO_2 ve H_2O varlığına bağlı olarak dolgunun özgül ısı kapasitesinin artmasıyla ilişkilidir. Seyreltme O_2 'nin azalmasıyla ilişkilidir, kimyasal etki yanma sırasında türlerin ayrılmasıyla ilgilidir. Bunlar arasında en önemlisi sirküle edilen gaz sıcaklığını etkileyen termal etkidir (Hountalas vd 2006). Şekil 4.1'de EGR olan ve EGR olmayan sistemdeki difüzyon alevi gösterilmiştir.



Şekil 4.1 Dizel motor difüzyon alevi a) Motorda EGR sistemi varken b) Motorda EGR sistemi yokken (Prior vd 2005)

EGR'nin asıl etkisi dolgu içindeki oksijen konsantrasyonunu azaltmak ve yanma ürünlerinin sıcaklığını düşürmektir. EGR tutuşmayı, yanma prosesini ve diğer motor çıkış emisyonlarını etkiler. Yanma başlangıcını tanımlamak için basınç yükselmesinin başlaması, parlama başlangıcı veya belli bir enerji miktarının yayılması gibi birçok kriter kullanılmıştır. Motor sisteminde EGR'nin bulunması tutuşma gecikmesi üzerinde de etkilidir. EGR yokken yanma başlangıcı 1.53 BTDC (üst ölü noktadan önce) iken %45 EGR oranında bu değer 3.53 BTDC'ye çıkmaktadır. Tutuşma gecikmesindeki bu yükseliş iki şekilde açıklanabilir. Birincisi dolgu içindeki oksijen konsantrasyonunun düşmesi, ikincisi ise dolgu sıcaklığının düşmesidir. EGR ile ön yanmadaki artış, EGR'den kaynaklanan tutuşma gecikmesindeki artışla açıklanmaktadır. Daha uzun

tutuşma gecikmesi daha fazla yakıtın buharlaşmasına ve havayla karışmasını sağlayacak zaman sağlar (Nitu vd 2002).

Farklı EGR oranları ve farklı motor dönme sayılarıyla yapılan deneylerde EGR'nin azot oksitler ve diğer emisyonlar üzerine etkileri incelenmiştir. Standart, %10 ve %20 EGR oranları için yapılan deneylerde % 20 EGR oranı için motor dönme sayısı arttıkça azot oksitlerde azalma görülmüştür. %10 EGR uygulanan ve standart motorda benzer davranışlar gözlenmiştir. %20 EGR uygulamasında azot oksit emisyonu 50 ppm'den yaklaşık sıfır değerine düştüğü görülmüştür (Haşimoğlu vd 2002).

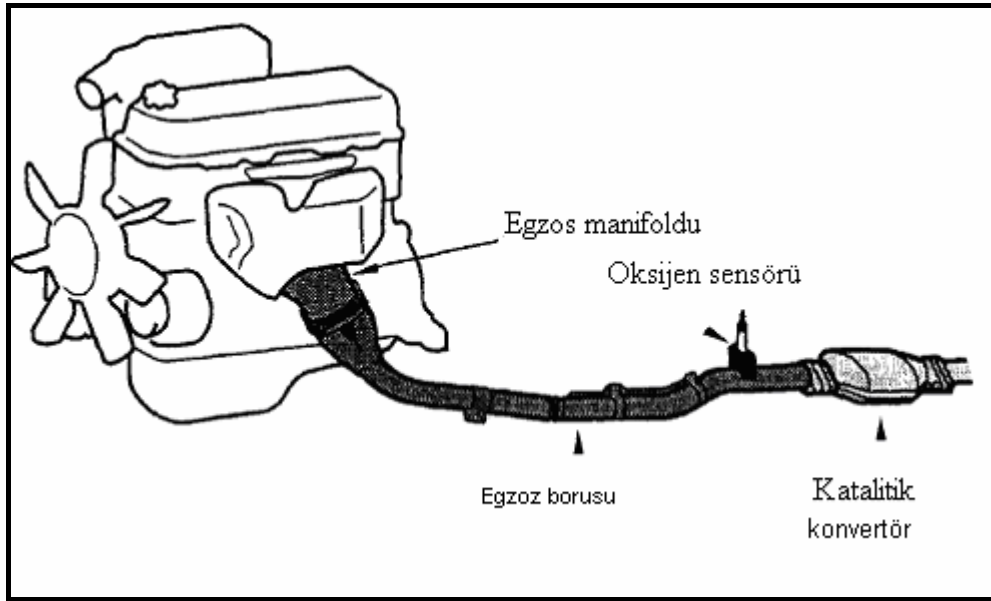
Yapılan bir diğer çalışmada yine EGR'nin emisyonlar üzerine etkisi incelenmiştir. 1500 dev/dak motor dönme sayısı ve 800 bar enjeksiyon basıncında deneyler gerçekleştirilmiştir. Standart, %25, %35, %45 ve %50 EGR oranları için ölçümler yapılmıştır. Burada ön plana çıkan azot oksit emisyonlarındaki azalmadır. Standart motorda yaklaşık 800 ppm ölçülen azot oksit emisyonları %50 EGR uygulamasında yaklaşık olarak 50 ppm değerine düşmüştür. EGR oksijen konsantrasyonunu düşürerek yanma ürünleri sıcaklığını düşürmektedir. Bu da NO_x emisyonlarında ki düşmenin sebebi olarak açıklanmıştır. Diğer emisyonlar (CO, HC ve is) emisyonları artan EGR oranıyla artış göstermiştir (Nitu vd 2002).

4.2. Seçici Katalitik İndirgeme (SCR)

SCR, NO_x'un azaltılması için sıkça kullanılan egzoz gazında iyileştirme yöntemidir. Birçok olası katalist içinden en etkili olanı Ag/Al₂O₃'tür. Ag/Al₂O₃, biyodizel-etanol-dizel yakıt karışımında özellikle güçlü bir NO_x emisyonlarında düşme sağlamaktadır. Ayrıca etanol ve Ag/Al₂O₃ kullanıldığında SCR'den sonra toplam HC ve CO oranı yükselmektedir. SCR kullanılmadan kullanılan biyodizel-etanol-dizel karışımıyla karşılaştırıldığında HC'da 7 kat ve CO emisyonunda da 13 kat artış görülmüştür. Toplam hidrokarbondaki artış SCR prosesinden sonra kalan etanolden kaynaklanmaktadır. Bundan dolayı SCR'den sonra oksidasyon katalisti kullanılarak HC ve CO emisyonları düşürülmelidir (Xioyan vd 2008).

4.3. Katalitik Konvertörler

Katalitik konvertörler egzoz akışında istenilen kimyasal reaksiyonların oluşabilmesi ve zararlı emisyonların düşürülmesi için kullanılırlar. Özellikle konvertörler HC, CO ve NO_x emisyonlarını N₂, H₂O ve CO₂'e dönüştürmek için kullanılırlar. Şekil 4.2' de katalitik konvertörün yeri gösterilmiştir.



Şekil 4.2 Konvertörün yeri (WEB_7 2008)

Katalitik konvertörde kullanılan maddeler, HC ve CO için oksidasyon katalistleri platinyum ve paladyum, NO_x için azaltıcı katalist rhodyum, oksidasyon verimini yükseltmek için ve oksidasyon kapasitesini iyileştirmek için seryumdur.

Katalitik konvertörde gerçekleşen reaksiyonlar;

NO_x için 4.1 ve 4.2 no'lu reaksiyonlar gerçekleşmektedir.



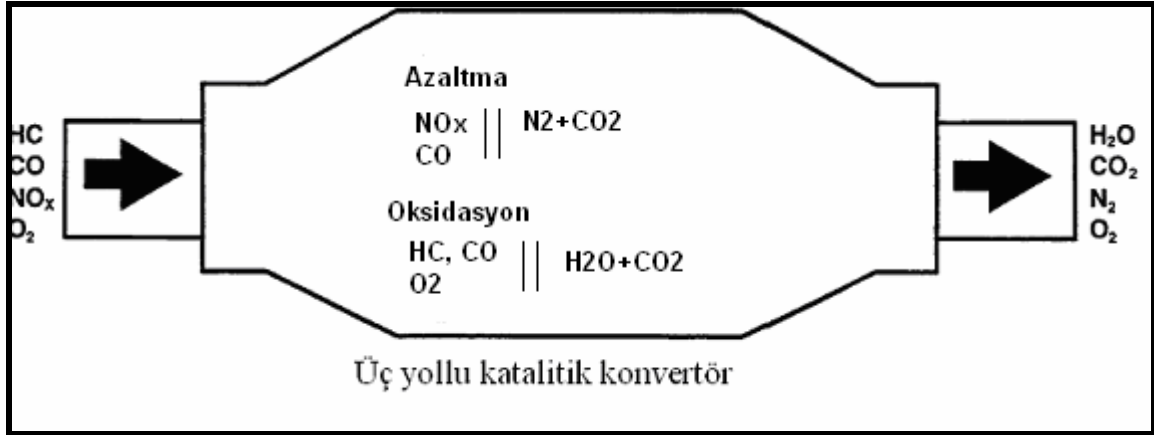
CO için 4.3 no'lu reaksiyon gerçekleşmektedir.



HC için 4.4 ve 4.5 no'lu reaksiyon gerçekleşmektedir.



Şekil 4.3’de katalitik konvertörde gerçekleşen reaksiyonlar gösterilmiştir.



Şekil 4.3 Üç yollu konvertörde gerçekleşen kimyasal reaksiyonlar (WEB_8 2008)

Katalistler iki faktörden etkilenirler; çalışma sıcaklığı ve gaz kompozisyonu. Katalistler yaklaşık olarak 287 °C’de çalışmaya başlarlar, bununla birlikte 400 °C’ye ulaşmadan etkin bir temizleme gerçekleşmez (WEB_8 2008).

4.4. Nemli Hava Motorları

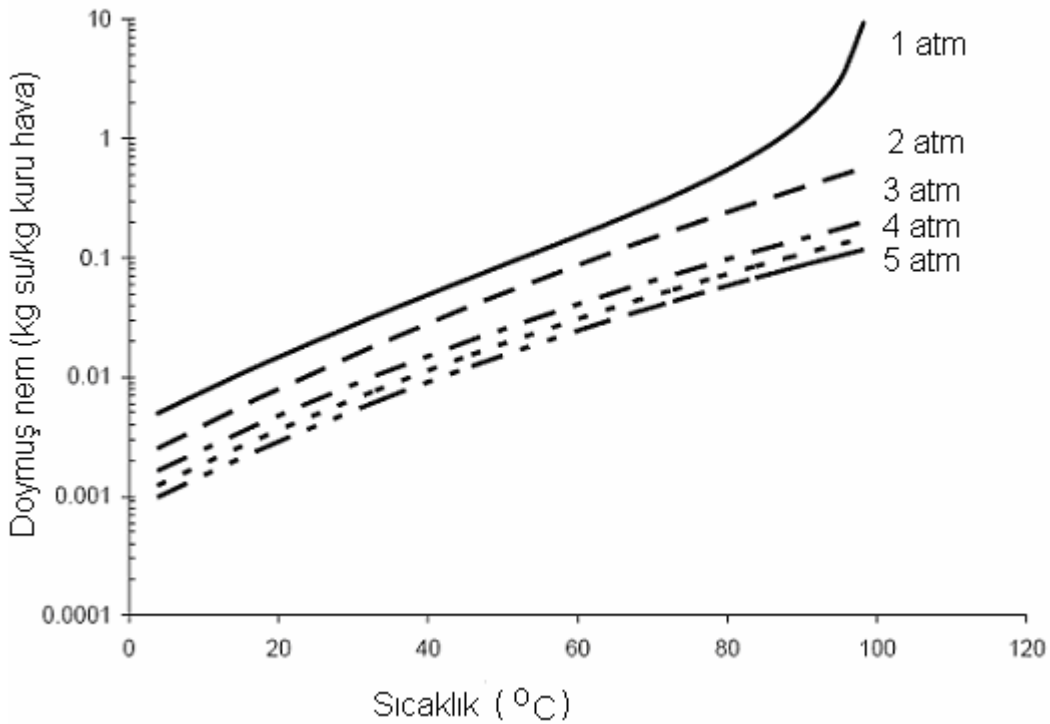
NO_x azaltma teknikleri içinde giriş havasının nemlendirilmesi farklı çeşitli şekillerde yapılmaktadır. Fakat burada önemli olan silindir içine suyun buharlaşmış olarak girmesidir. Aksi takdirde sıvı olarak girmesi sonucu silindirde çeşitli korozyon problemleri ortaya çıkacaktır. Yüksek NO_x düşüşleri sağlamak için esas olan havanın neminin motora girerken doymuşluğa yakın olması ve hava giriş manifoldu sıcaklığının motorun tolere edebileceği sınırlar içinde olmasıdır (Prior vd 2005).

Nemlendirme sisteminin başarıyla uygulanabilmesi için birkaç parametre üzerinde durulması gerekmektedir. Bunlar;

- Hava ve suyun karıştığı noktadan, nemli havanın motora girdiği noktaya kadarki hava sıcaklığı.
- Su damlacık çapı.
- Havanın buharlaştığı yerde giriş sisteminin yeri.
- Motor yükü ve su/hava oranı.

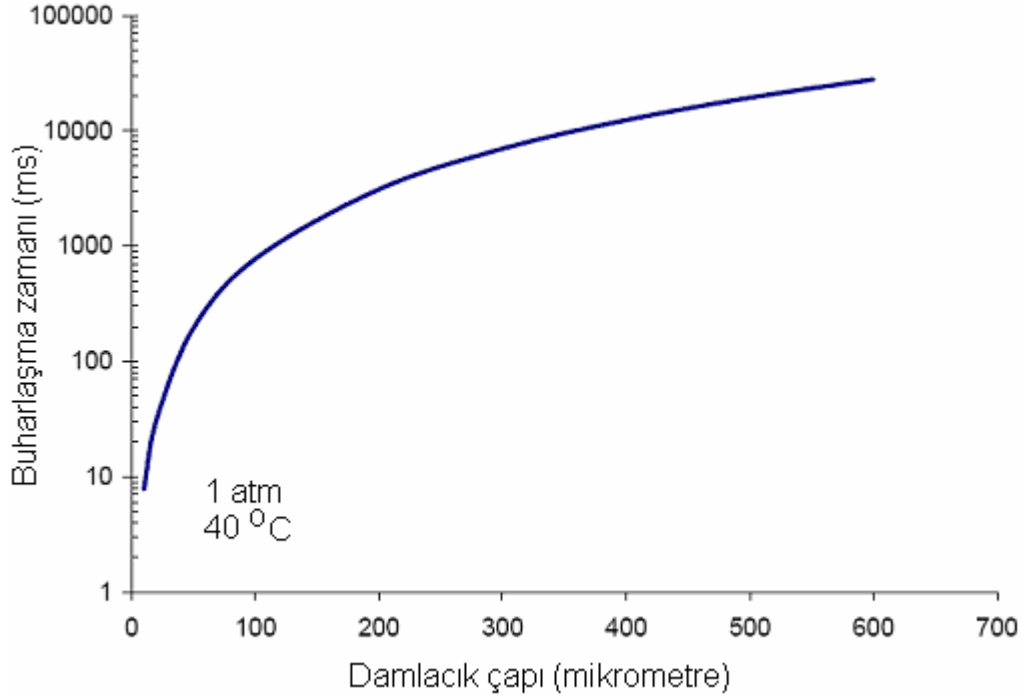
Bu parametreler birbirine bağlıdır ve içlerinden birinde yapılacak değişiklik diğer parametreleri de etkileyecektir. Örneğin motor yüklemesindeki değişiklik yüklenen havanın basınç ve sıcaklığını da değiştirecektir. Düşük motor yükleri ve hızları NO_x oluşumu için daha fazla zaman verecek ve NO_x artışına sebep olacaktır (Prior vd 2005).

Havanın nem taşıma kapasitesinde basınç ve sıcaklığın etkisi büyüktür. Şekil 4.4'de sıcaklık ve çeşitli basınçlarda havanın mutlak nemi (kg su/kg kuru hava) verilmiştir. Genel olarak havanın nem taşıma kapasitesi artan sıcaklıkla artar ve basınçla ters orantılı olarak düşer. Sıcaklıktaki 10°C artış havanın taşıyabileceği nem miktarını ikiye katlamıştır (Prior vd 2005).



Şekil 4.4 Çeşitli basınç ve sıcaklıklarda havanın mutlak nemi (Prior vd 2005)

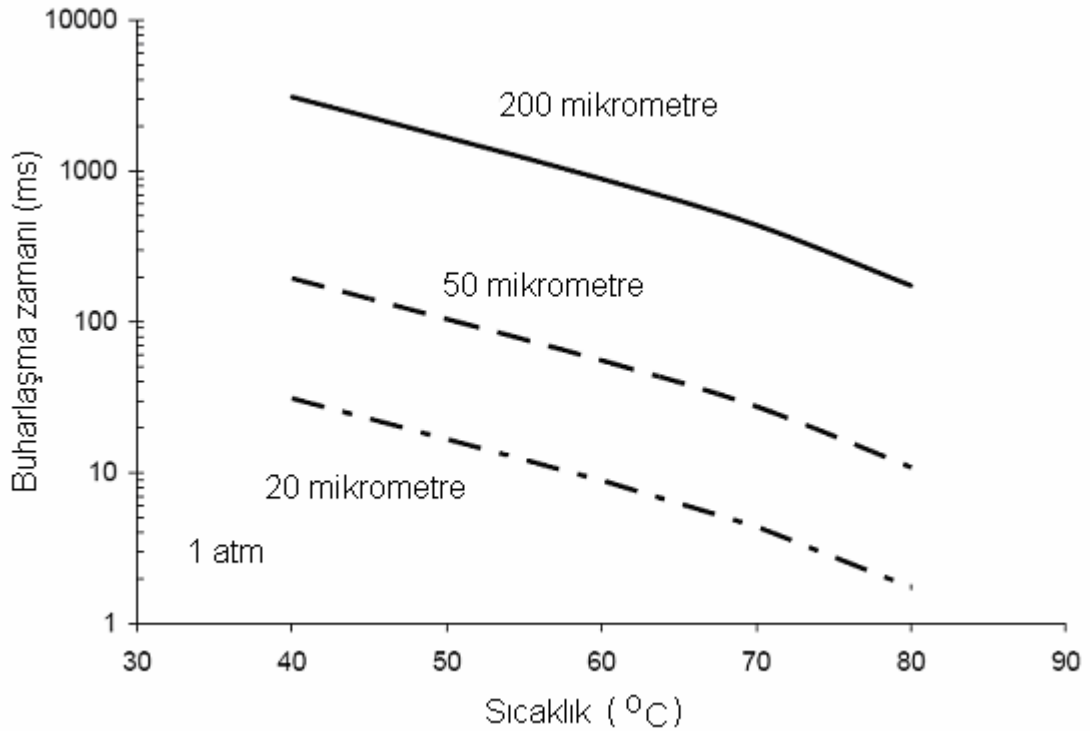
Giriş havası nemlendirmesi genellikle su püskürtmesiyle yapılır ve su damlacıklarının buharlaşmasına bağlıdır. Şekil 4.5’de damlacık çapına bağlı olarak geçen buharlaşma zamanı verilmiştir.



Şekil 4.5 1 atm ve 40 °C’de kuru havada damlacık buharlaşma zamanı (Prior vd 2005)

Nemlendirme için ne kadar düşük sıcaklığa ulaşılabiliyorsa ve yanma odasına suyun girişi yaklaşılabiliyorsa, küçük damlacık çapı elde etmek o kadar kritik hale gelir. Şekil 4.6’da sıcaklığın damlacıkların buharlaşma zamanına etkisi görülmektedir. Açıkça görülmektedir ki sıcaklık iyi bir damlacık buharlaşması elde etmek için kritik bir değerdir.

Dizel motorlarda giriş havası nemlendirmesinin yeri üç şekilde gerçekleştirilmektedir. Kompresörden önce, kompresörden sonra fakat ara soğutucudan önce, ara soğutucudan sonra olarak hava nemlendirmesi yeri seçilmektedir. Hava ön ısıtma yapılmadıkça, kompresörden önceki sıcaklığı düşüktür. Düşük sıcaklık düşük basınçla dengelenmektedir, bu da iyi bir buharlaşma sağlamamaktadır. Zayıf buharlaşma, sıkıştırma işleminin verimini iyileştirirken, kompresör hasarlarına yol açabilir. Eğer gerekli önlemler alınırsa kompresörden önce nemlendirme mümkün kılınabilir.



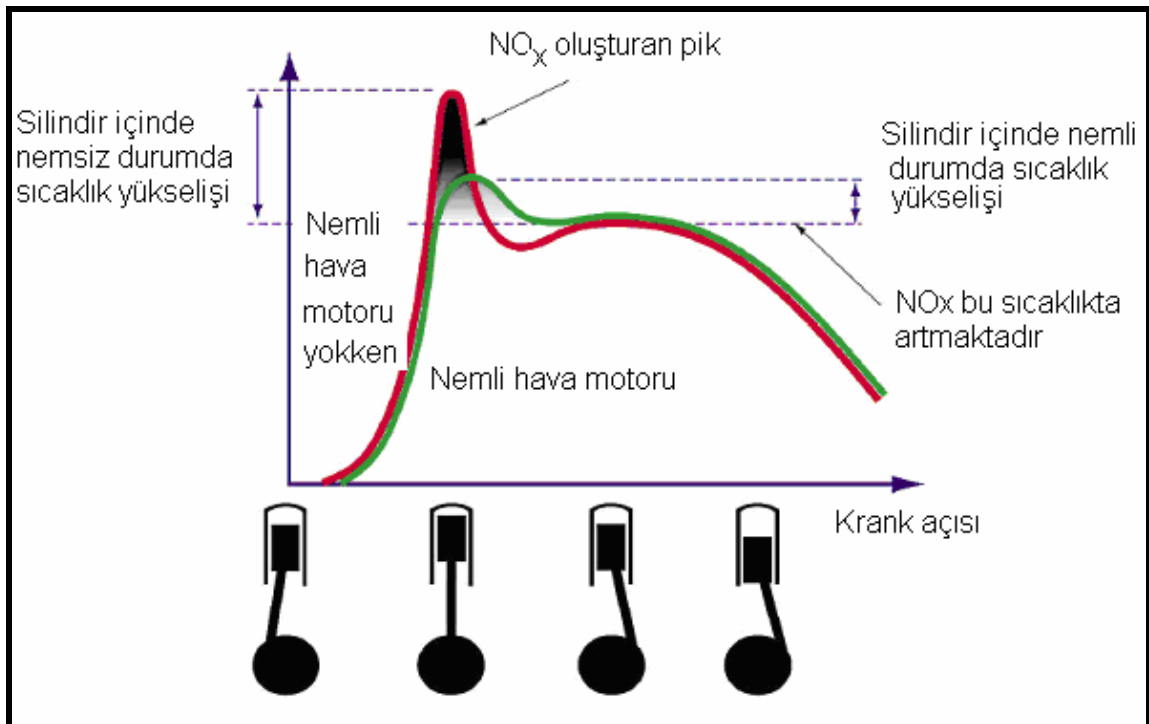
Şekil 4.6 Damlacık buharlaşma zamanına sıcaklığın etkisi (Prior vd 2005)

Nemlendirme için bir başka seçenekte kompresörün hemen çıkışında yapılmasıdır. Burada sıcaklık yaklaşık olarak 100°C civarındadır ve bu da suyun kaynama noktasının üstündedir. Bu çok iyi bir damlacık buharlaşması sağlar. Nemlendirme soğutma etkisi ara soğutucuya giren soğutma akımının iyileşmesini sağlar. Böylelikle giriş manifoldundaki sıcaklık havadaki nemin maksimum olması sağlanır ve ayrıca oluşabilecek motor problemlerini engeller.

Nemlendirme için üçüncü bir yer ise ara soğutucudan sonradır. Bu tercih edilen iyi bir yöntem değildir, çünkü ara soğutucu çıkışındaki hava sıcaklığı zaten düşüktür ve ek bir nemlendirme ile hava sıcaklığı daha da düşerek nemlendirme potansiyelini de düşürmüş olur. İkinci bir problem ise damlacıkların buharlaşması için gereken süre burada yanma odasına yakınlığından dolayı kısalmaktadır.

Düşük motor yüklerinde NO_x oluşumu için daha fazla zaman bulunmaktadır. Motor yüklemesindeki değişiklik dolgu sıcaklık ve basıncını da etkilemektedir. Şekil 5.8'de

nemli hava motorunda yanma prosesindeki sıcaklık değişimi ve NO_x oluşumu gösterilmektedir.



Şekil 4.7 Nemli hava motorunda yanma prosesindeki sıcaklık değişimi (WEB_9 2008)

Sistem tasarımı havanın taşıyabileceği nemi en yüksek değere çıkarmalı fakat sudan dolayı oluşabilecek silindir içindeki korozyon problemlerine yol açmamalıdır. Ayrıca giriş havası sıcaklığındaki değişimlerden kaynaklanabilecek ters etkileri de engellemelidir.

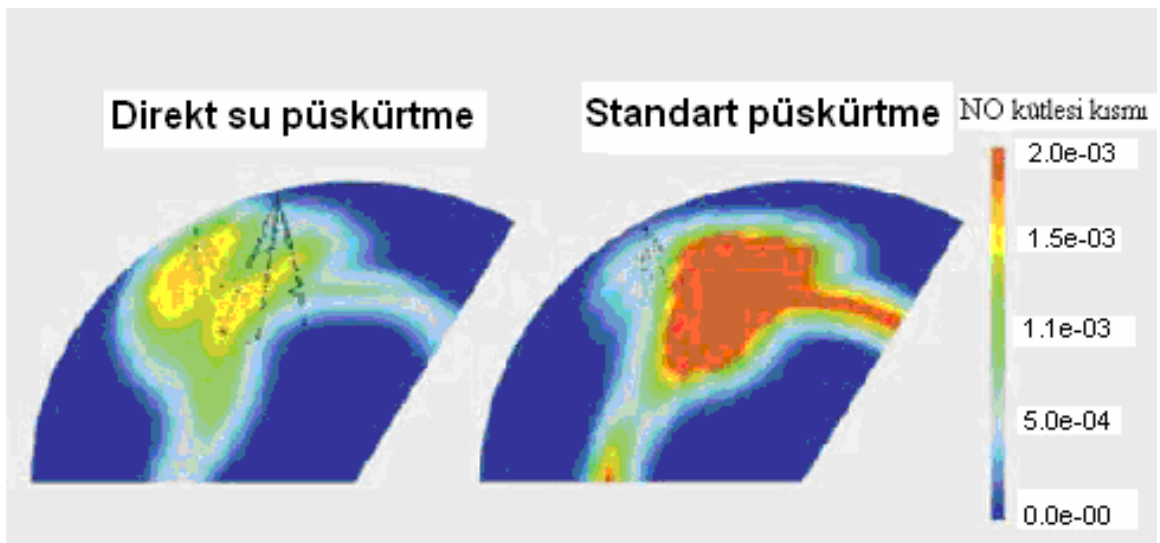
4.5. Direkt Silindir İçine Püskürtme

Bu metod iki şekilde uygulanabilir. Birincisi ayırma nozuluyla direkt olarak silindir kafası içine suyun püskürtülmesiyle, ikinci olarak da özel olarak tasarlanmış nozul içinden su ve yakıtı birbiri ardına göndermektir. Bu iki sistemin de ana teması yanmanın olduğu silindir içindeki maksimum sıcaklığı düşürerek NO_x emisyonlarını azaltmaktır. Şekil 4.8'de direkt su püskürtme için kullanılan bir nozul örneği gösterilmiştir.



Şekil 4.8 Direkt su püskürtme için kullanılan nozul örneği (Prior vd 2005)

Ayırma nozuluyla silindir içine direkt olarak suyun enjekte edilmesinin avantajı su miktarının ve suyun enjekte edildiği zamanın değişken olduğu ve yakıttan ayrı ayrı kontrol edilebilirliğidir. Yakıtle birlikte tek nozuldan sırayla enjekte edilen su miktarı değişken olabilir bununla birlikte enjeksiyon zamanı su/yakıt oranına bağlıdır. Bu yöntemlerle silindir içine önemli miktarda su enjeksiyonu gerçekleştirilebilir ve bununla ciddi değerde NO_x emisyonu azalması sağlanabilir. Direkt olarak püskürtmenin diğer bir avantajı ise suyun direkt olarak alev (yanma bölgesine) daha verimli şekilde püskürtülmesidir. Su püskürtme ile buharlaşır ve daha homojen bir karışım sağlar. Şekil 4.9’da direkt su püskürtmesinin olması ve olmaması durumunda yanma işleminin model çalışması gösterilmiştir (Prior vd 2005).



Şekil 4.9 Direkt su püskürtmesinin olması ve olmaması durumunda yanma işleminin model çalışması (Prior vd 2005)

Bu yöntemde NO_x üzerinde en çok etkisi olan parametre püskürtülen suyun miktarıdır. Bununla birlikte NO_x ve diğer emisyonlar üzerine etki eden çeşitli parametreler de mevcuttur. Bu parametrelerin çoğu suyun püskürtülme zamanı, ve püskürtme yeri gibi koşullara bağlıdır. Motorun çalıştığı yükte direkt olarak emisyonlar üstüne etki etmektedir. Direkt olarak su püskürtme ile yanma odası içindeki sıcaklık düşürülmektedir. Artan su/yakıt oranıyla NO_x 'taki düşüş artmaktadır. Fakat su miktarının çok fazla artırılması is, HC ve PM emisyonlarında artışa neden olabilmektedir (Prior vd 2005).

4.6. Yakıt-Su Karışımı

Bu yöntemde yanma odasına yakıt-su karışımı püskürtülür. Su önce yakıtta eklenir ve yakıt nozulu içinden püskürtme yapılır. Bu yöntemde de yanma odası sıcaklığının düşürülmesi esas alınmıştır.

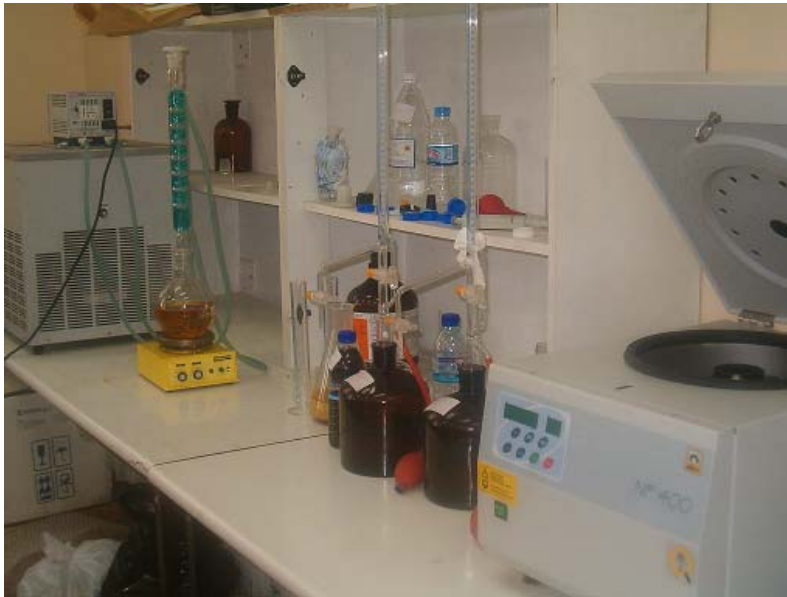
Yakıt-su karışımı kullanılan sistemde her bir %1'lik su/yakıt karışımı artışı ile %1 NO_x emisyonu azalması sağlanmıştır. NO_x azalması sadece suyun püskürtülmesine değil ayrıca yakıt-su karışımının iyi atomizasyonuna ve yanmadan önce karışımına da bağlıdır. İS ve yakıt tüketimi gibi diğer emisyonlara da olumsuz bir etkisi görülmemiştir. Fakat burada %30 oranında su miktarıyla sınırlandırma getirilmiştir. Ayrıca püskürtülen giriş suyunun silindir içine çok geç veya çok erken girmesi riski mevcuttur. Bu, tutuşma gecikmesini arttıracak olan tüm silindirin soğumasına, motor ses seviyesinin artışına ve tamamlanmamış yanmaya neden olabilir. Bir başka dezavantajı ise motor çalışmasının düşük yüklerde, durma ve başlangıçların aksamasıdır (Prior vd 2005).

5. DENEY DÜZENEKLERİ VE TEST TEKNİKLERİ

5.1. Biyodizel Üretim Deney Düzenegi ve Teknikleri

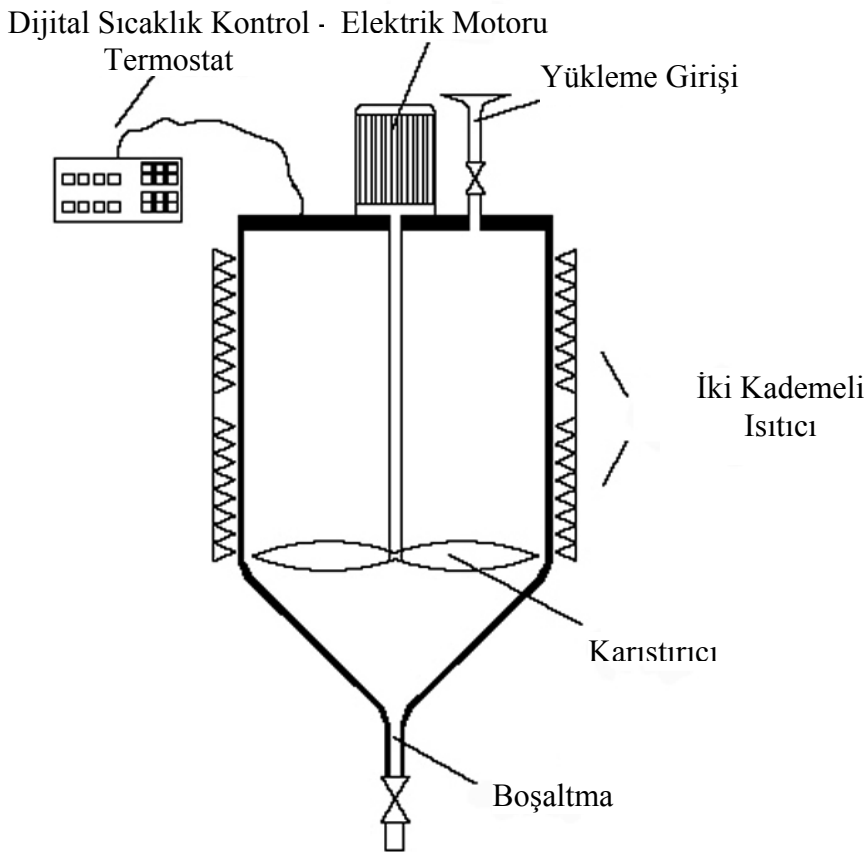
Yapılan bu çalışmada ham ve rafine kanola yağı, sabun stoğu, atık kızartma yağları ve tütün tohum yağlarından transesterifikasyon yöntemi ile biyodizeller üretilmiştir. Kanola yağları, sabun stoğu ve atık yağlar piyasadan temin edilmiş, fakat tütün yağı, tütün tohumundan Pamukkale Üniversitesi Makine Mühendisliği içten yanmalı motorlar laboratuvarında bulunan yağ çıkarma ünitesi kullanılarak elde edilmiştir.

Yapılan çalışmalarda biyodizel örnekleri önce küçük miktarlarda üretilmiştir. Daha sonra büyük miktarda üretim yapılmıştır. Küçük miktardaki örnekler laboratuvarında bulunan cam malzemelerden oluşan düzeneklerde üretilmiştir. Şekil 5.1’de kullanılan malzemeler görülmektedir. Üç boğazlı balon içerisine konan yağ/alkol/katalizör karışımının sıcaklığını kontrol edebilmek için boğazın birine termometre yerleştirilmiştir. Ayrıca merkezdeki boğaza soğutma ünitesine bağlı olan geri soğutucu konarak buharlaşan alkolün geri kazanılması sağlanmıştır. Balonun üçüncü ağzı ise aralarda numune almak kullanılmıştır.



Şekil 5.1 Küçük ölçekte biyodizel üretimi için düzenek (Su soğutucusu, üç boğazlı balon, geri soğutucu, manyetik karıştırıcı, serbest yağ asitliği ölçümü için hazırlanan çözeltiler ve santrifüj)

Biyodizel üretimi sırasında gerçekleştirilen işlemler; alkolle katalizörün karıştırılması, alkol-katalizör karışımının yağla reaksiyona sokulması, biyodizel ile gliserinin ayrılması, biyodizelin saf suyla yıkanması ve biyodizelin kurutulması işlemleridir. Büyük miktarda biyodizel üretimi için Şekil 5.2 ve 5.3’de görülen paslanmaz çelik reaktör kullanılmıştır.

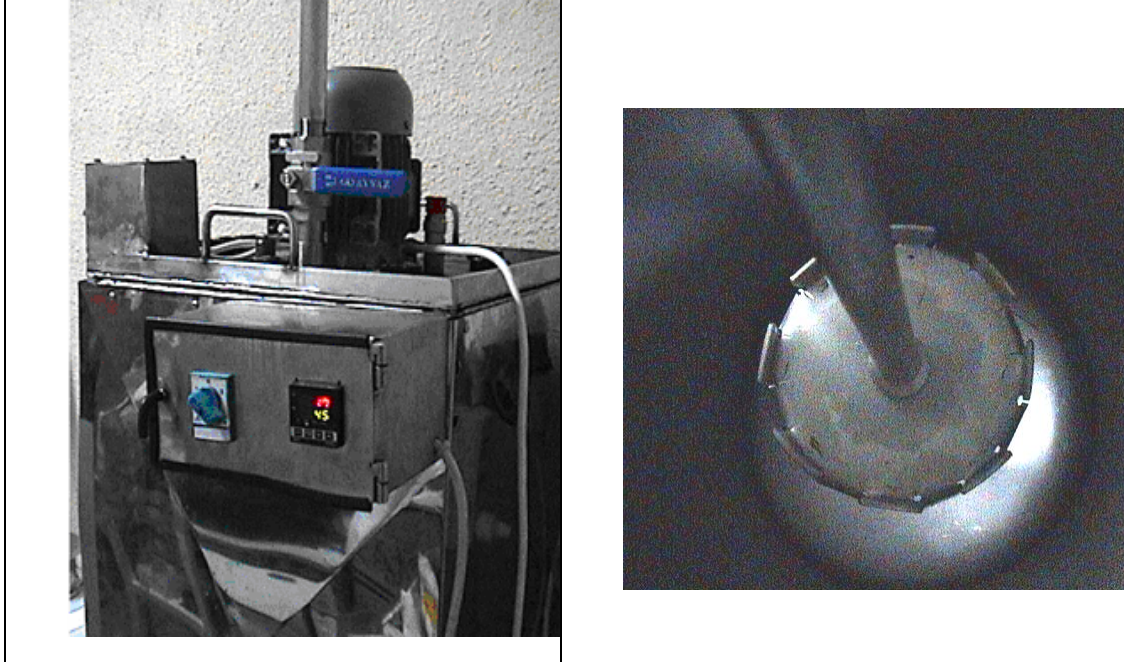


Şekil 5.2 Biyodizel reaktörünün şematik görünüşü

Biyodizel üretimi sırasında tipik biyodizel üretimi çalışmalarında 1 kg bitkisel rafine yağ için 3.5 g sodyum hidroksit (NaOH) ve kütlece %25 (250 g) metil alkol kullanılmıştır. Önce NaOH hassas terazide tartılmış ve metil alkolle manyetik karıştırıcıda karıştırılmıştır. Karıştırılan bu metil alkol-NaOH karışımı reaktörde 55°C’ye ısıtılmış olan yağ üzerine yavaşça eklenmiştir.

Yağ-alkol-NaOH karışımı reaktörde 60 °C’de 2 saat karıştırılarak reaksiyonun tamamlanması sağlanmıştır. Reaksiyon sonucunda biyodizel ve gliserin olarak iki faz oluşmaktadır. Karıştırma işlemi durdurulduktan sonra reaksiyon 8 saat beklemeye

bırakılmıştır. Bu bekleme esnasında molekül ağırlığı daha yüksek olan gliserin dibeye çökmektedir. Reaktörün bekleme süresinden sonra alt vana vasıtasıyla dibeye çöken gliserin alt kısımdan alınarak reaktörde biyodizelin kalması sağlanmıştır.



(a)

(b)

Şekil 5.3 Biyodizel reaktörünün resmi (a) Reaktörün dış görünümü, (b) Reaktör karıştırıcısı

Biyodizelin içinde reaksiyondan kalan katalizör ve sabunların uzaklaştırılması için saf suyla yıkama işlemi gerçekleştirilmiştir. Her biyodizel üretiminde ortalama olarak 3 defa yıkama işlemi gerçekleştirilmiştir. Burada gözle görülebilen önemli kriter konulan suyun geri alındığında yaklaşık olarak aynı berraklıkta olmasıdır. Biyodizelin suyla yıkama işlemi 55°C 'de gerçekleştirilmiş ve yine her yıkama işleminden sonra 8 saat beklemeye bırakılarak suyun çökmesi sağlanmıştır.

Suyla yıkanan biyodizel reaktörden alındıktan sonra içinde kalan suyun uzaklaştırılması için yaklaşık olarak 110°C 'ye ısıtılmıştır. Bu sıcaklığa ulaşıldıktan sonra yaklaşık olarak 15 dakika ısıtma süreci devam etmiştir. Bu ısıtma işlemi sırasında karıştırma da yapılarak suyun daha çabuk buharlaşması sağlanmıştır. Suyu giderilen biyodizel bidonlara alınarak saklanmıştır. Bidonlar biyodizelin ışığa direkt olarak maruz

kalmaması için renkli bidon olarak seçilmiş ya da bidonlar siyah kalın poşetlere sarılmıştır.

En son elde edilen biyodizellerden örnekler TÜBİTAK Marmara Araştırma Merkezi'ne gönderilmiş ve analizleri yaptırılmıştır. Gelen analiz sonuçlarına göre standartlara uymayan değerler üzerinde çalışmalar yapılmıştır.

5.1.1. Kanola yağı

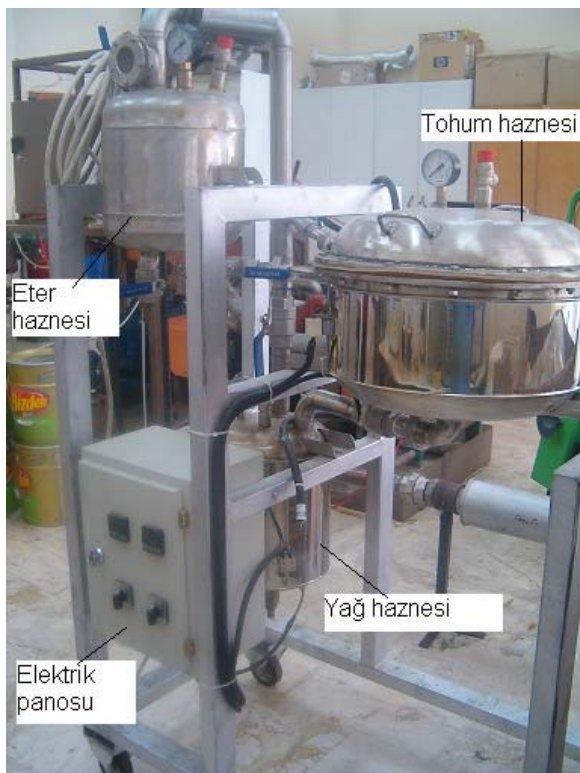
Kanola Avrupa'da biyodizel üretiminde kullanılan en yaygın yağlı tohum bitkisidir. Yapılan bu çalışmada ham ve rafine kanola yağlarından biyodizel üretilmiştir. 1979 yılında Türkiye'de sağlığa zararlı yönleri bulunduğu için ekimi yasaklanmış fakat daha sonra zararsız türlerinin üretimiyle tekrar ekimine izin verilmiştir. Kanola yazlık ve kışlık olmak üzere iki çeşide sahiptir. Bunlardan kışlık kanola -15 °C'ye kadar dayanıklıdır. Hem tohumdan çıkarılan ve işlem görmemiş ham kanola yağından hemde işlenmiş rafine kanola yağından biyodizel üretilmektedir. Buradaki fark rafine işleminin gerçekleşmesi ile yağın içindeki yabancı maddelerin arındırılmasıdır. Bu işlem biyodizel üretimini kolaylaştırmaktadır. Ham kanola yağından biyodizel üretime geçmeden önce su uçurma işlemi gerçekleştirilmiş fakat rafine için buna gerek duyulmamıştır. Kanola yağı biyodizelinin standartlara yakın özellikler göstermesi bu yağın seçiminde önemli bir faktördür. Asitlik değeri ve iyot sayısı düşük, donma noktası diğer yağlara göre daha düşüktür. Bundan dolayı kanoladan biyodizel üretimi yaygın durumdadır.

5.1.2. Tütün tohumu yağı

Tütün tohumu yağının kullanım alanı bulunmadığı ve piyasadan temin edilemediği için laboratuvar ortamında elde edilmiştir. Bunun için çeşitli yerlerden tütün tohumu toplattırılmıştır. Toplattırılan bu tohumlardan laboratuvarında bulunan yağ çıkarma ünitesinde yağ elde edilmiştir. Şekil 5.4'de yağ çıkarma ünitesi görülmektedir.

Yağ çıkarma işleminde, tohum kabukları önce kırılmıştır. Daha sonra yağ çıkarma ünitesine konarak üstüne yağ çözücü kimyasal olarak dietileter eklenmiştir. Kırılmış tohumlar üzerine koyulan dietileter sızdırmaz bölüm içinde bir süre bekletilerek yağı

tohumdan ayırması sağlanmıştır. Daha sonra yağ ve eter karışımı vana yardımıyla alt bölmeye alınmıştır. Burada elektrikli ısıtıcılar vasıtasıyla içerideki karışımın ısınması sağlanmıştır. Dietilelerin buharlaşma sıcaklığı yaklaşık 37 °C'dir. Bu yüzden düşük sıcaklıkta buharlaşan eter üst kısımda bulunan vana yardımıyla basınçla dışarı alınmıştır. Ünitenin dışında kurulan sistemde soğutucular yardımıyla dietilelerin yoğuşması sağlanmış ve geri kazanılmıştır. Daha sonra alt kısımda kalan tütün yağı vanadan alınarak filtre kâğıtlarıyla süzölmüştür. Halen içerisinde bir miktar dietileler olmasından dolayı filtrelenmiş tütün yağı tekrar ısıtılarak içerisinde bulunan dietileler tamamen uzaklaştırılmıştır. Isınan tütün yağı tekrar filtreden geçirilip içindeki yabancı maddelerden arındırılmıştır. Şekil 5.5'te tütün tohumundan yağ çıkarma işleminin safhaları gösterilmektedir. Şekil 5.6'da ise kullanılan dietilelerin geri kazanılması için kullanılan soğutma sistemi görölmektedir.



Şekil 5.4 Yağ çıkarma ünitesi

5.1.3. Sabun stokları

Sabun stoğu, yemeklik yağ fabrikalarında yağ üretiminde yan bir ürün olarak ortaya çıkmakta ve sabun üreticileri tarafından kullanılmaktadır. Sabun stokları ayçiçek yağı,

findık yağı, mısır yağı gibi çeşitli yağların atık maddesi olarak görülebilir. Sabun stokları yüksek serbest yağ asitlik derecesine sahiptir. Bundan dolayı sabun stoklarından biyodizel üretimi oldukça zor bir işlemdir. Örneğin bu çalışmada kullanılan sabun stoğunun serbest yağ asitliği derecesi ölçülmüş ve 149 mg KOH/g değeri bulunmuştur. Bu yüksek değer biyodizel üretiminde gliserin ve biyodizel fazlarının ayrışmasına engel olacaktır. Serbest yağ asitliğini düşürmek için sabun stoklarına önce asit katalizör (H_2SO_4) ve alkol (metanol) kullanılarak serbest yağ asitliğinin düşürülmesi yoluna gidilmiştir. Asit katalizör kullanılan reaksiyonlar sonucunda sabun stoğunun serbest yağ asitlik derecesi düşürülmüştür. Daha sonra baz katalizör (NaOH) ve alkol (metanol) kullanılarak sabun stoğu biyodizel dönüşürülmüştür.



Şekil 5.5 Tütün tohumundan yağ çıkarılmasının safhaları a) Tohum haznesinin boş şekli, b) Tohumların haznede kalmasını sağlayan tülün hazneye konması, c) Tohumun hazneye konulması, d) Tohumların tül ile örtülmesi, e) Tohumlara dietilelerin eklenmesi, f) Hazne kapağının kapatılması.



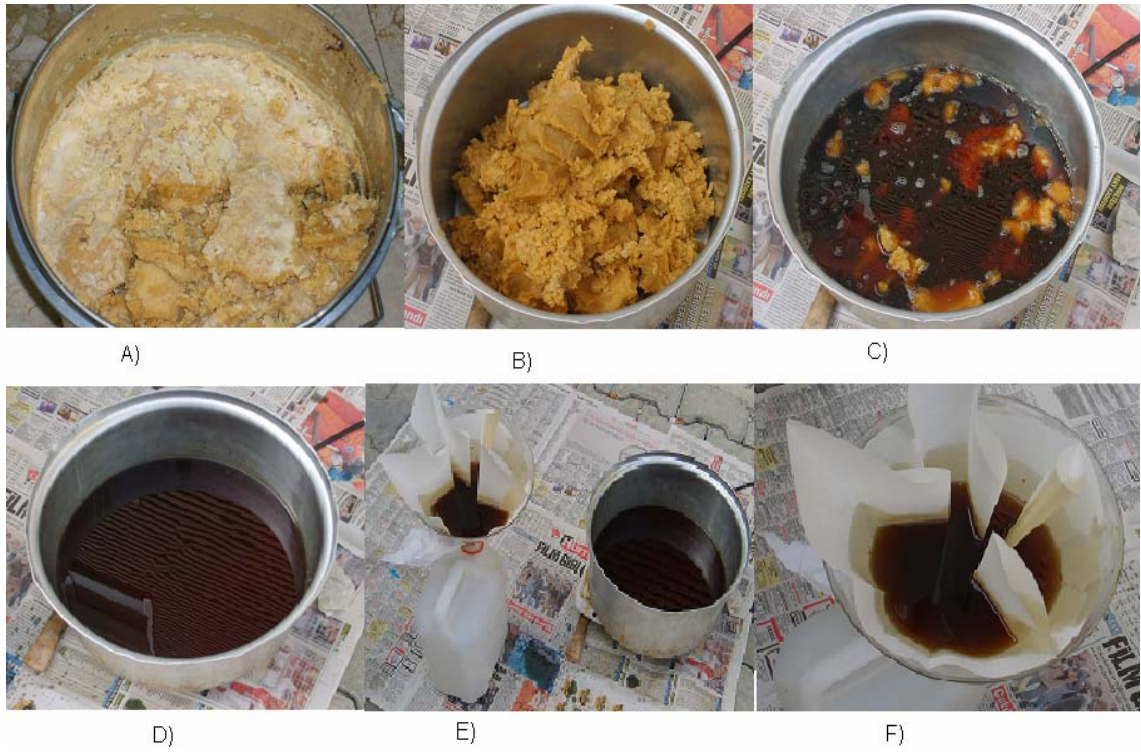
Şekil 5.6 Dietileter geri kazanım için soğutma ünitesi

5.1.4. Atık yağlar

Atık yağlar lokanta ve yemek fabrikalarının kullandığı kızartma ayçiçek yağı ve hızlı gıda satıcılarının kullandığı gibi karışım kızartma yağları olmak üzere iki çeşide ayrılabilir. Karışım yağları özel olarak sadece bu tip hızlı gıda satıcıları vb. yerlerde kullanılmak amacıyla üretilmektedir. Karışım yağlarının içinde pamuk, ayçiçek, soya ve palm gibi farklı yağlar bulunmaktadır. Palm yağının donma sıcaklığı yüksek olduğundan dolayı karışım yağlar oda sıcaklığında dahi katı halde bulunabilmektedirler. Bu çalışmada karışım yağlarla birlikte atık patetes kızartma yağı kullanılmıştır.

Atık yağlar için serbest yağ asitlik değerinin fazla olması önceki bölümlerde de bahsedildiği üzere atık yağların biyodizel yapılmasında problem oluşturmaktadır. Şekil 5.7’de atık karışım yağın biyodizele dönüştürülmeden önceki geçirdiği safhalar görülmektedir. Serbest yağ asitlik değeri yüksek yağlardan biyodizel yapımı sırasında serbest yağ asitleriyle baz katalizörün reaksiyonu sonucu sabun ve bir miktar su oluşmaktadır. Ayrıca esterleşme reaksiyonunda biyodizel ve gliserinin ayrışmasını engellemektedir.

Bundan dolayı yapılan bu çalışmada kullanılan atık yağların asitlik dereceleri ölçülerek yüksek çıkanların düşürülmesi sağlanmıştır. Bu çalışmada 1’den 10’a kadar numara verilen karışım atık yağlarının asitlik ölçüm değerleri Tablo 5.1’de verilmiştir.



Şekil 5.7 Atık yağlardan biyodizel üretmeden önce yapılan işlemler. A) Karışım atık yağ, B) Karışım yağın ısıtılmak için ayrılması, C) Karışım yağın erimeye başlamış hali, D) Karışım yağın erimiş hali, E) karışım yağın süzülmesi, F) Süzgeç kağıdından karışım yağın süzülmesi.

Tablo 5.1 Kullanılan karışım atık yağlarının serbest yağ asitlik değerleri

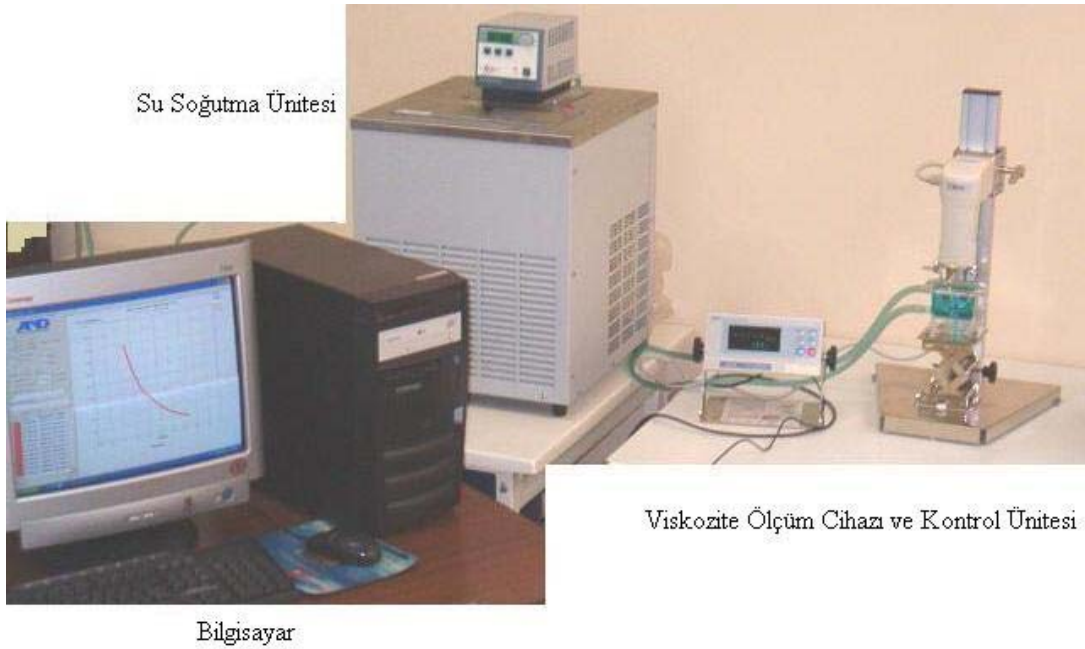
Numune adı	Serbest yağ asitlik (SYA) değeri (mg KOH/g)
1 No'lu karışım atık yağı	4.4
2 No'lu karışım atık yağı	9.2
3 No'lu karışım atık yağı	9.6
4 No'lu karışım atık yağı	10.7
5 No'lu karışım atık yağı	19.3
6 No'lu karışım atık yağı	4.0
7 No'lu karışım atık yağı	1.4
8 No'lu karışım atık yağı	6.7
9 No'lu karışım atık yağı	1.8
10 No'lu karışım atık yağı	5.8

Tablo 5.1'den de görüldüğü üzere karışım atık yağlarından 5 numaralı olanın asitlik değeri 19.3 mg KOH/g olarak en yüksek değerdedir. Bu çalışmada önce 5 numaralı yağ üzerinde çalışmalar yapılarak asitlik değeri düşürülmeye çalışılmıştır. Bunun için önce 250 g numunelerle denemeler yapılmıştır. Yapılan deneylerde çeşitli miktarlarda metanol ve sülfürik asit kullanılmış ve deney süresi değiştirilmiştir. Alkol miktarı, asit miktarı, reaksiyon süresi ve reaksiyon sıcaklıkları için optimum değerler elde edilmeye çalışılmıştır. Deneyler sonucunda serbest yağ asitliğinin 2.25 katı oranında metanol ve serbest yağ asitliğinin %20'si oranında H₂SO₄ kullanılması durumunda serbest yağ asitliği 0.5 mg KOH/g değerinin altına 1 saat içinde düşürülmüştür.

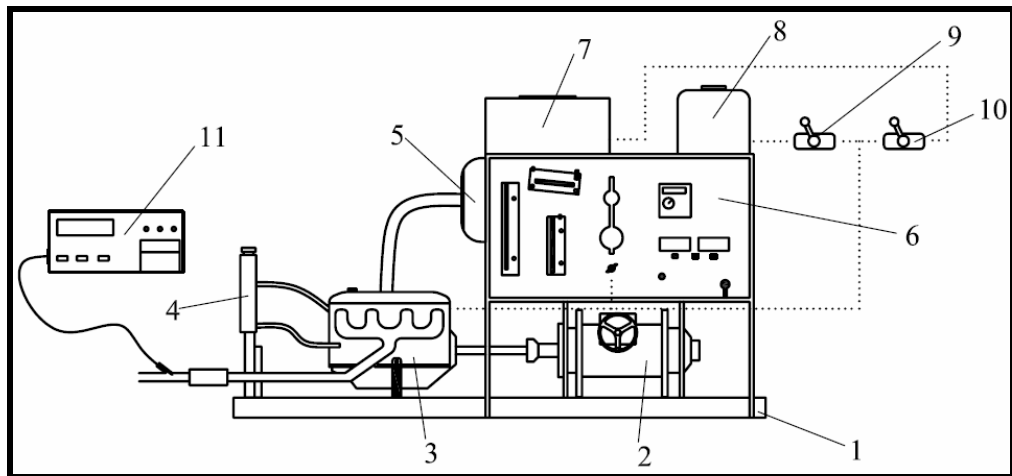
Biyodizel için en önemli parametrelerden biri de viskozitedir. Biyodizelin kötü soğuk akış özellikleri nedeniyle düşük sıcaklıklarda problemler oluşmaktadır. Düşük sıcaklıklarda viskozite yükselmekte tortu, filtre tıkanması gibi problemlere neden olmaktadır. Bu yüzden bu çalışmada kullanılan biyodizellerin viskozitesi de ölçülmüştür. Viskozite ölçümleri bir bilgisayara bağlanan AND marka SV-10 tipi Tuning-Fork Titreşim Metodu ile ölçüm yapan bir viskozimetre cihazıyla 5 ve 50°C sıcaklıklar arasında yapılmıştır. Şekil 5.8'de ölçümlerde kullanılan viskozimetre cihazı gösterilmektedir. Viskozite ölçümü yapılacak olan numune 10 ml'lik özel kaba alındıktan sonra viskozimetrenin özel çift cidarlı kabına yerleştirilmektedir. Daha sonra soğutma ünitesinin hortumlarının bağlı olduğu çift cidarlı kap soğutulmaktadır. Numune içine ölçüm yapacak olan sensör levhalarla birlikte cihazda bulunan termoelaman da daldırılmaktadır. Böylece sıcaklığa bağlı olarak viskozite değişimi cihazın paket programı sayesinde bilgisayara aktarılmaktadır.

5.2. Motor Test Düzeneği ve Teknikleri

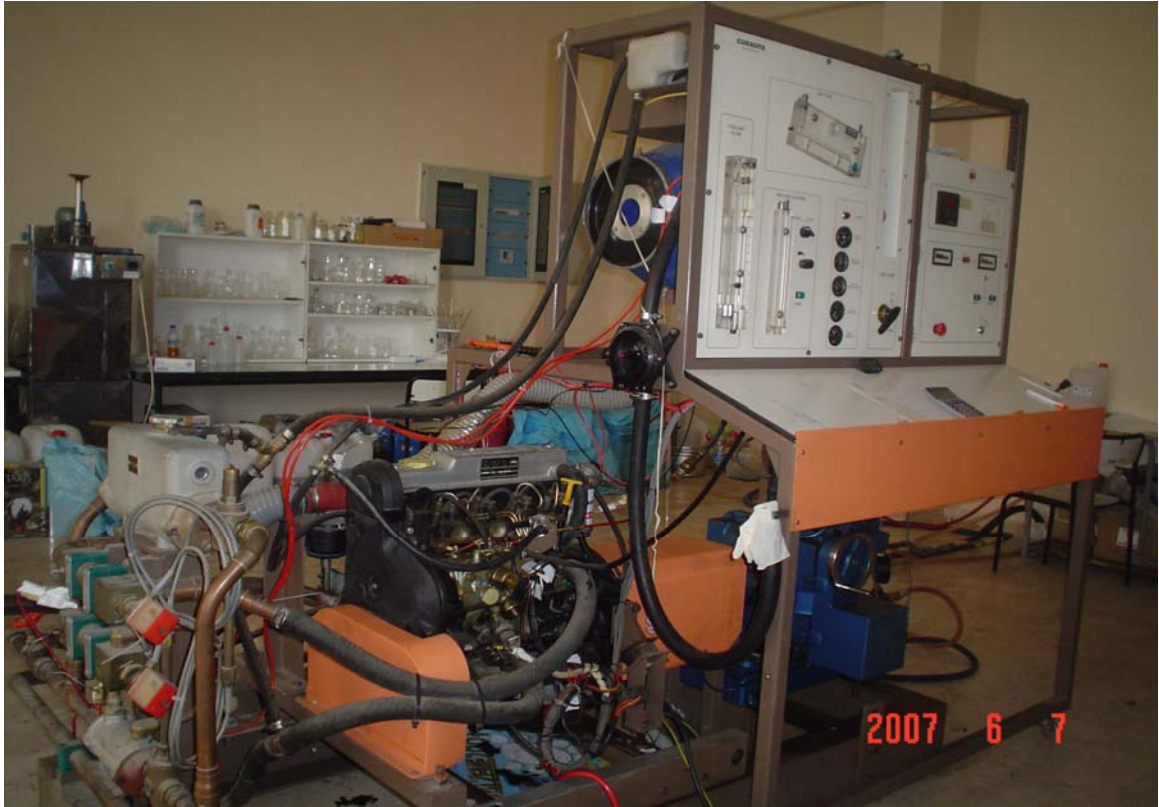
Yapılan çalışmalarda ön yanma odalı dört silindirli turbo dizel bir motor kullanılmıştır. Ayrıca motora yükleme yapmak için 9000 dev/dak'da 112 kW(150 Hp) güç absorbe edebilen hidrokinetik dinamometre kullanılmıştır. Şekil 5.9 ve Şekil 5.10'da kullanılan motor test düzeneği ve Tablo 5.2'de motorun teknik özellikleri verilmiştir.



Şekil 5.8 Viskozite ölçüm cihazı



Şekil 5.9 Deney sisteminin şematik resmi (Cussons P8601 Motor Test Düzeneği) 1- Deney düzeneği şasisi, 2-Hidrokinetik dinamometre, 3-Deney motoru, 4-Soğutma sistemi, 5-Hava giriş tankı, 6-Kontrol paneli, 7-Dizel yakıt tankı, 8-Alternatif yakıt tankı (biyodizel), 9-Biyodizel yakıt hattı kontrol valfi, 10-Dizel yakıt hattı kontrol valfi, 11-Egzoz gaz ölçüm cihazları.



Şekil 5.10 Deney sisteminin resmi

Tablo 5.2 Deney motorunun teknik özellikleri

Motor Tipi	Ford XLD 418T, IDI (Ön yanma odalı), 4 Zamanlı, Turboşarjlı, Su Soğutmalı, Dizel
Silindir Sayısı	4
Silindir Çapı	82,5 mm
Silindir Stroğu	82,0 mm
Silindir Hacmi	1,753 litre
Sıkıştırma Oranı	21,5/1
Maksimum Güç	55 kW (4500 dev/dak.)
Maksimum Tork	152 Nm (2200 dev/dak.)
Enjeksiyon Pompa Tipi	Distribütör tipi

Motor testlerinde elde edilen emisyon değerlerinin ölçülmesi için kullanılan emisyon ölçüm cihazları Şekil 5.11 ve Şekil 5.12’de gösterilmektedir.



Şekil 5.11 Bosch BEA 170 duman ölçer

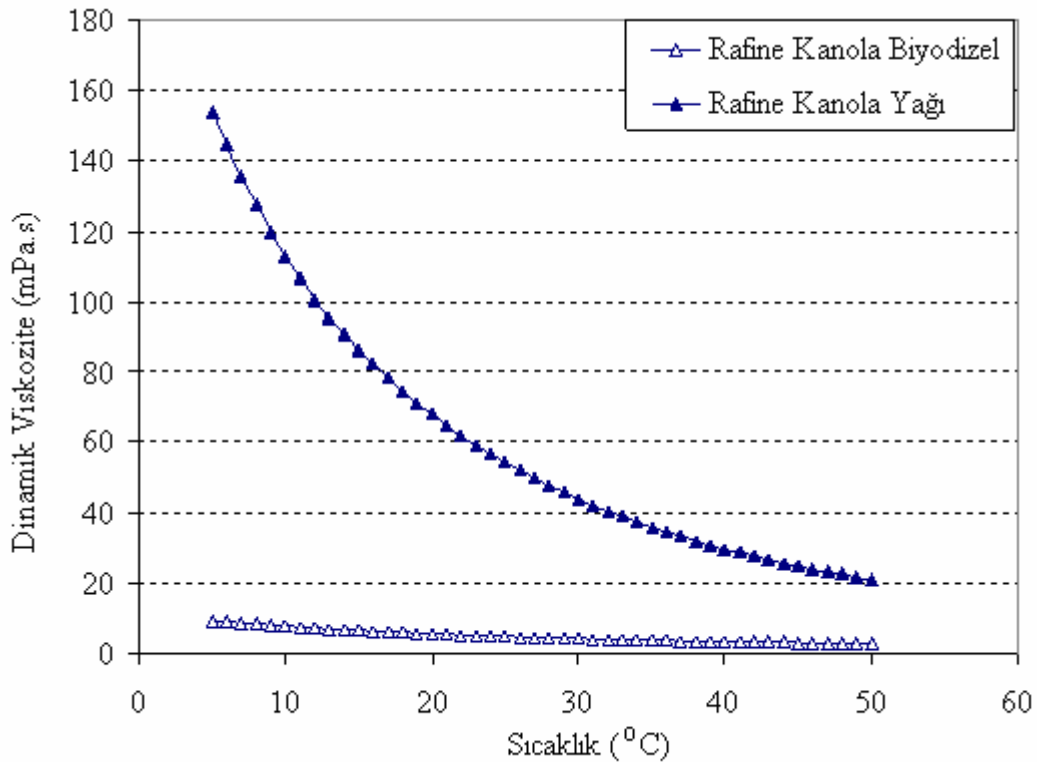


Şekil 5.12 Testo 350 M/XL gaz analizörü

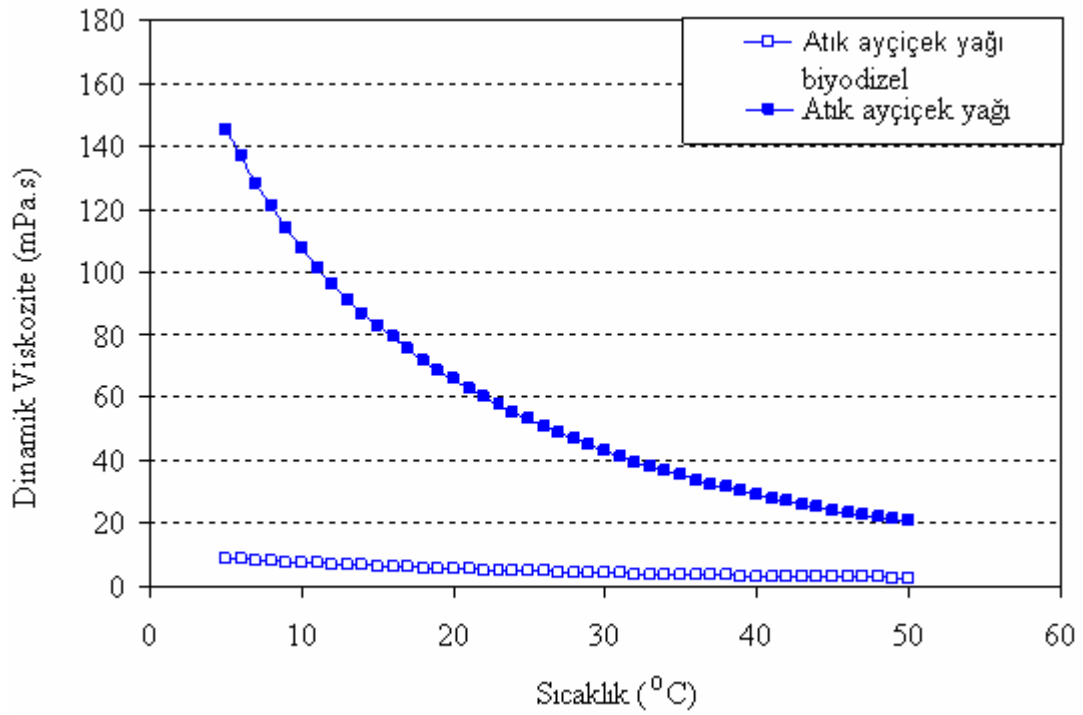
6. MOTOR TEST SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRME

Dizel motorlarda kullanılacak alternatif yakıtların en önemli özelliklerinden birisi viskozitedir. Her ne kadar standartlarda 40°C’de yakıtın viskozite değerinin belirli limitler içinde olması zorunluluğu getirilmiş olsa da düşük sıcaklıklarda viskozite artışının incelenmesi önemli bir çalışmadır. Bu yüzden motor test sonuçlarından önce üretilen biyodizel yakıtlarının ve hammaddelerinin viskoziteleri 5-50°C sıcaklık aralığında ölçüm sonuçları burada verilmektedir. Rafine kanola yağı ve biyodizeli, atık ayçiçek yağı ve biyodizeli, tütün tohumu yağı ve biyodizeli ve sabun stoğu ve biyodizeli için gerçekleştirilen sıcaklığa bağlı viskozite değişimleri Şekil 6.1, 6.2, 6.3 ve 6.4’te verilmiştir.

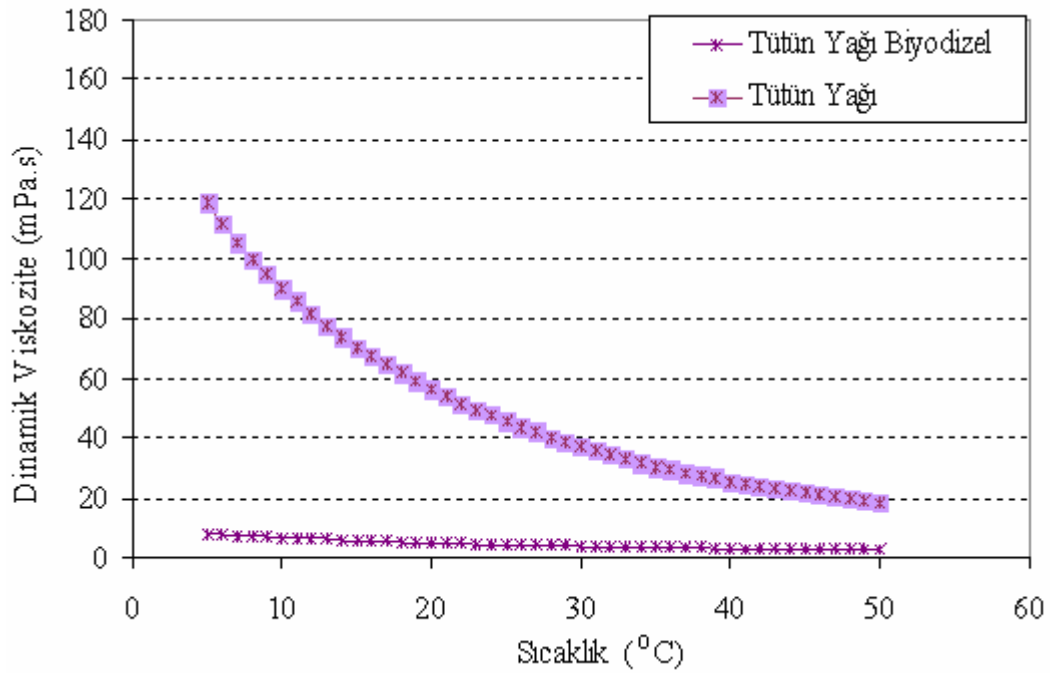
Şekil 6.1, 6.2, 6.3 ve 6.4’de görüldüğü gibi transesterifikasyon yöntemi sonucu elde edilen biyodizelin viskozitesi hammaddeye göre oldukça düşük seviyelere inmektedir. Özellikle sıcaklık düştükçe, hammaddelerin viskozitelerinde aşırı derecede artış olmasına rağmen, biyodizellerin viskoziteleri çok az oranda artmıştır. Bu durum bitkisel yağların doğrudan dizel motorlarda kullanımında büyük problemlerin oluşabileceğini açıkça göstermektedir.



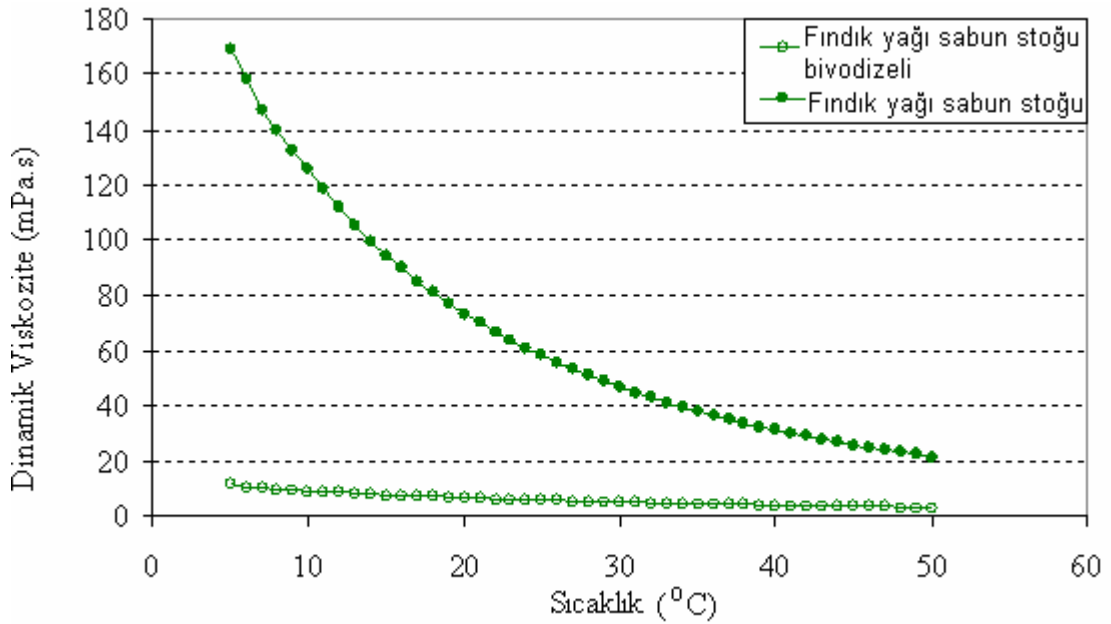
Şekil 6.1 Rafine kanola yağı ve biyodizelinin sıcaklıkla viskozite değişimi



Şekil 6.2 Atık ayçiçek yağı ve biyodizelinin sıcaklıkla viskozite değişimi



Şekil 6.3 Tütün yağı ve biyodizelinin sıcaklıkla viskozite değişimi



Şekil 6.4 Sabun stoğu ve biyodizelinin sıcaklıkla viskozite değişimi

Türkiye’de motorin standardı olan TS 3082 EN 590 standardında dizel yakıt No.2’ye hacimsel olarak maksimum %5 oranında TS EN 14214 standardına uygun metil ester (biyodizel) ilavesine izin verilmesi ve ayrıca birçok otomotiv firması %5’lik oranı garanti kapsamına almasından dolayı kanola, tütün, atık ayçiçeği yağı, atık karışım yağ ve fındık sabun stoğundan %5 oranında dizel yakıt ilavesi ile motorda test işlemleri yapılmış olup, elde edilen deneysel sonuçlar %5 biyodizelin dizel yakıt No.2’ye ilavesi ile motor emisyonlarında ve performansında dikkate değer bir değişme olmadığını ortaya koymuştur. Bununla birlikte atık ayçiçeği yağından yapılan biyodizelin farklı oranlarda dizel yakıt No.2 ile karışımları motorun tam yükünde farklı dönme sayılarında test edilmiştir. Bu bölümde, atık ayçiçeği yağından üretilen biyodizel ile ilgili yapılan deneylerin sonuçları verilmektedir.

Deneysel sonuçların verildiği şekillerde sadelik olması açısından kullanılan yakıtlar için bazı kısaltmalar kullanılmıştır. Şekillerde, D100 %100 dizel yakıt No.2’yi, B10 %10 atık ayçiçek yağı biyodizeli + %90 dizel yakıt No.2’yi, B20 %20 atık ayçiçek yağı biyodizeli + %80 dizel yakıt No.2’yi, B30 %30 atık ayçiçek yağı biyodizeli + %70 dizel

yakıt No.2'yi, B50 %50 atık ayçiçek yağı biyodizeli + %50 dizel yakıt No.2'yi ve B100 %100 atık ayçiçek yağı biyodizelini temsil etmektedir.

6.1. NO Emisyonları

Atık ayçiçek yağı biyodizelinin %10, %20, %30 ve %50 oranlarında dizel yakıt No.2'ye ilavesi ile elde edilen karışımların ve %100 biyodizelin, dizel motorda tam yükte ve farklı dönme sayılarında (1500 dev/dak, 2200 dev/dak ve 3000 dev/dak) oluşturduğu NO emisyonunun dizel yakıt No.2'nin oluşturduğu NO emisyonuna göre yüzde oran olarak değişimleri Şekil 6.5'de verilmektedir. 1500 dev/dak ve 2200 dev/dak motor dönme sayılarında dizel yakıtta biyodizel ilavesi NO emisyonunda %1,3 – 4,6 oranlarında değişen artışlara sebep olmaktadır. Her iki dönme sayısında da en fazla NO emisyonundaki artış B100 yakıt ile gerçekleşmiştir. Bununla birlikte, 3000 dev/dak motor dönme sayısında bütün yakıtlar ile NO emisyonunda artış görülmemektedir. B10, B20 ve B50 yakıtların kullanımı ile az bir oranda NO emisyonunda düşme olurken, B30 ve B100 yakıtlarının kullanımı ile NO emisyonunda artış olmuştur.

Bu çalışmada yapılan deneylerde genel eğilim, biyodizel kullanımı ile NO_x emisyonlarının artışı yönündedir. NO_x emisyonlarındaki artış biyodizelin içerdiği yaklaşık olarak kütlece %10 oksijen içeriğiyle açıklanabilir. Biyodizeldeki oksijen sayesinde daha iyi yanma ve daha yüksek yanma sıcaklıkları elde edilmektedir. Bu da NO_x emisyonlarının artışına neden olmaktadır. Elde edilen sonuçlar literatürde bulunan birçok çalışmalar (Çanakçı 2007, Ulusoy vd 2004, Raheman ve Ghadge 2007) ile paralellik göstermekle birlikte kullanılan motorun ve biyodizelin özellikleri, motor çalışma şartları ve ortam şartlarına bağlı olarak NO_x emisyonlarındaki değişimler farklılık göstermektedir.

6.2. CO Emisyonları

Dizel yakıt No.2'ye farklı oranlarda biyodizel ilavesinin CO emisyonuna etkisi Şekil 6.6'da verilmektedir. Biyodizel ilavesi ile dizel motor CO emisyonunda dizel yakıt No.2'ye göre bütün motor dönme sayılarında dikkate değer düşüşler tespit edilmiştir. Biyodizel kullanımı ile CO emisyonundaki düşme oranları %6 ile %42 arasında değişmektedir. En fazla düşüş 3000 dev/dak'da B100 ile gerçekleşmiştir. Biyodizel

kullanımı ile CO emisyonundaki düşme, biyodizel yakıt içerisinde bulunan oksijen ile daha iyi bir yanma sağlanması ile açıklanabilmektedir (Utlu ve Koçak 2008, Usta vd 2005).

6.3. SO₂ Emisyonları

Şekil 6.7'de farklı oranlarda atık ayçiçeği yağı biyodizelinin dizel yakıt No.2'ye ilavesi ile motorun SO₂ emisyonundaki değişimler gösterilmektedir. Bilindiği gibi SO₂ emisyonu yakıt içerisinde bulunan kükürt miktarı ile doğrudan ilgilidir. Yakıt içerisinde kükürt oranı arttıkça SO₂ emisyonu artar, azaldıkça SO₂ emisyonu azalır. Testlerde kullanılan atık ayçiçeği yağı biyodizelinin kükürt miktarı 10 ppm'in altında, dizel yakıt No.2'nin kükürt miktarı 350 ppm'in üzerinde olmasından dolayı, karışımda biyodizel oranı arttıkça SO₂ emisyonunda dikkate değer düşmeler görülmüştür.

6.4. İS Emisyonları

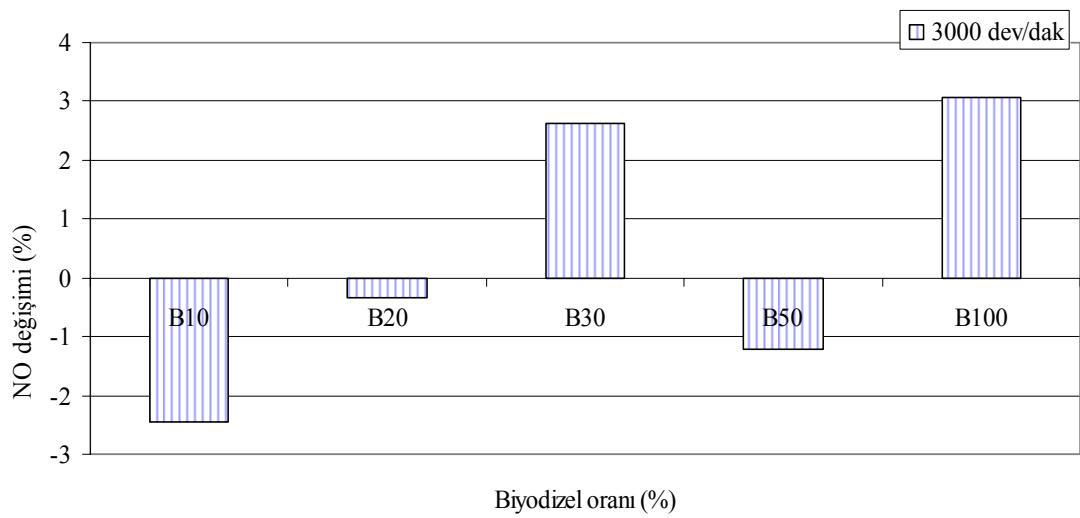
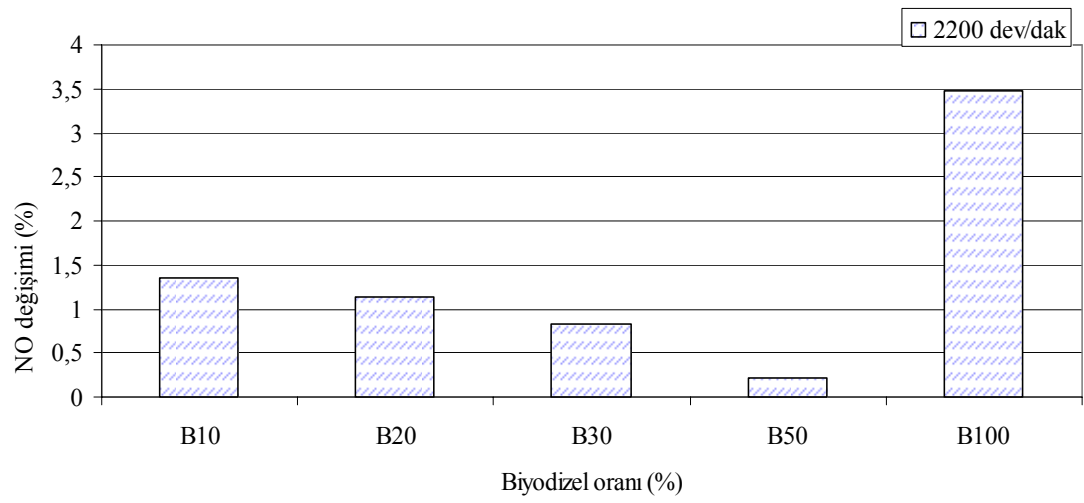
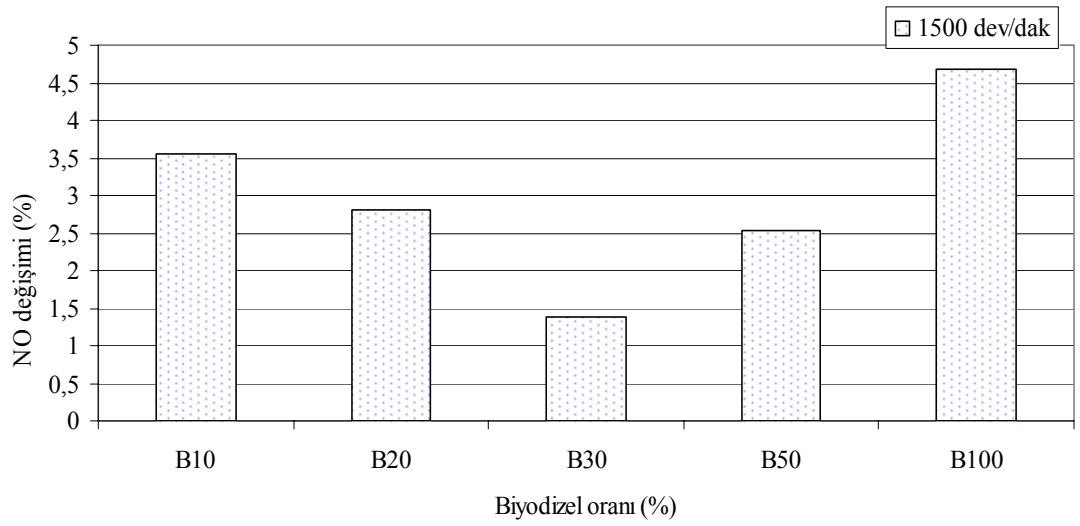
Biyodizel kullanımı ile CO emisyonuna benzer şekilde is emisyonunda düşmeler tespit edilmiştir (Şekil 6.8). İS emisyonundaki düşme yine yakıt içerisinde bulunan oksijenin daha iyi bir yanmaya yardımcı olması ile açıklanabilmektedir (Zheng vd 2008, Wu vd 2007, Usta vd 2005). Biyodizel kullanımı ile 1500 dev/dak motor dönme sayısında is emisyonları dizel yakıt No.2'ye göre %2 ile %47 arasında düşüş göstermiştir. 2200 dev/dak'da ise düşme miktarları %3 ile %50 arasında değişmektedir. Dizel yakıt No.2'ye göre en fazla is emisyonundaki düşme 3000 dev/dak'da B100 ile %70 oranında gerçekleşmiştir.

6.5. Motor Performans Parametreleri

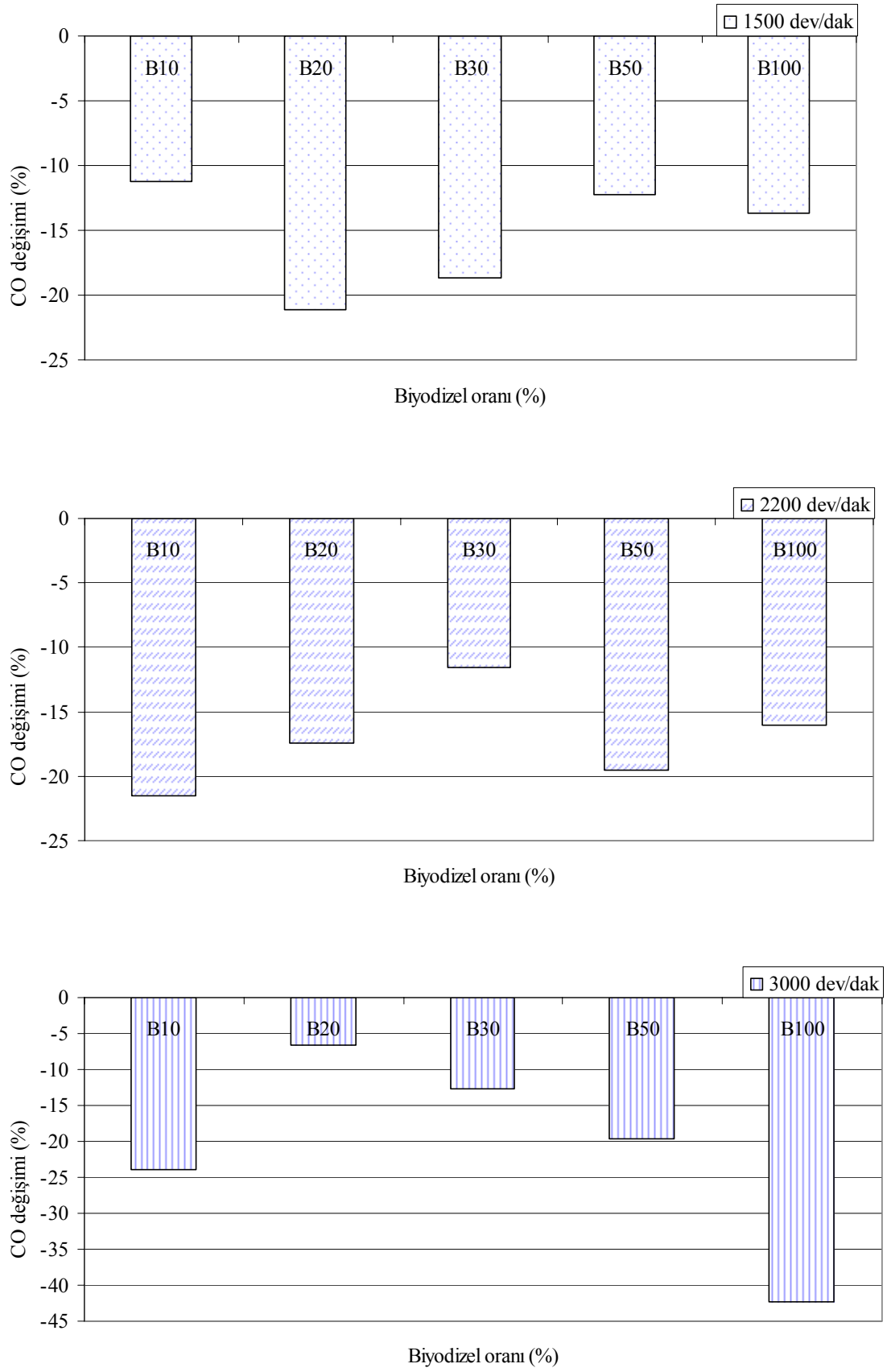
Farklı oranlarda atık ayçiçeği yağı biyodizelinin dizel motorda kullanımı ile dizel yakıt No.2'ye göre motor gücüne etkisi Şekil 6.9'da verilmektedir. Biyodizel kullanımı ile motor gücündeki değişim oranı \mp %2 olarak tespit edilmiştir. Biyodizel kullanımı ile motordaki güç artışı biyodizel içerisindeki oksijenin daha iyi yanmaya sebep olması ve biyodizelin yoğunluğunun bir miktar fazla olması ile açıklanabilir. Dizel motorda yakıt püskürtme pompasının hacimsel bazda çalışmasından dolayı yakıt yoğunluğu arttıkça

motora giren yakıt miktarı kütleli olarak artmaktadır. Bu da bir miktar güç artışına sebep olmaktadır. Bununla birlikte biyodizelin viskozitesinin dizel yakıt No.2'ye göre bir miktar yüksek olmasından dolayı atomizasyonda bazı problemler oluşmakta bu da güç düşüşüne sebep olabilmektedir.

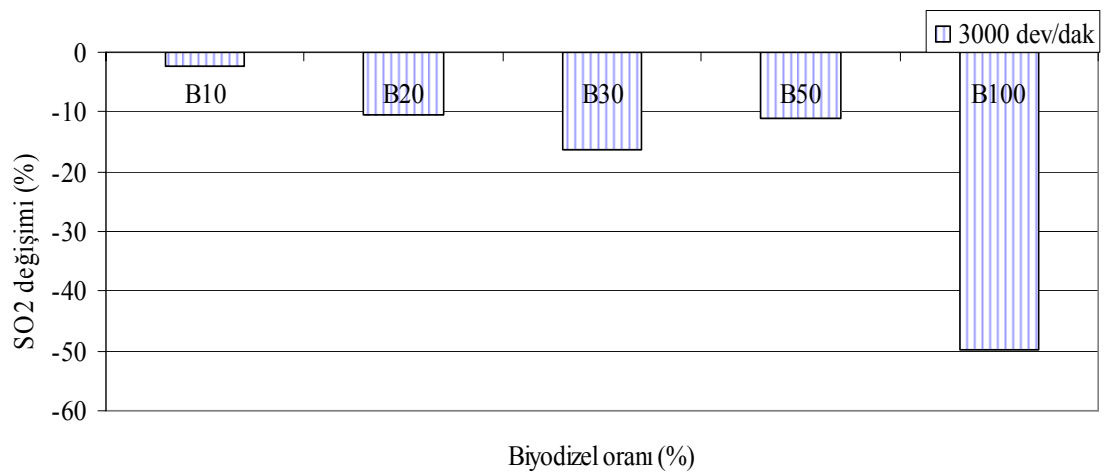
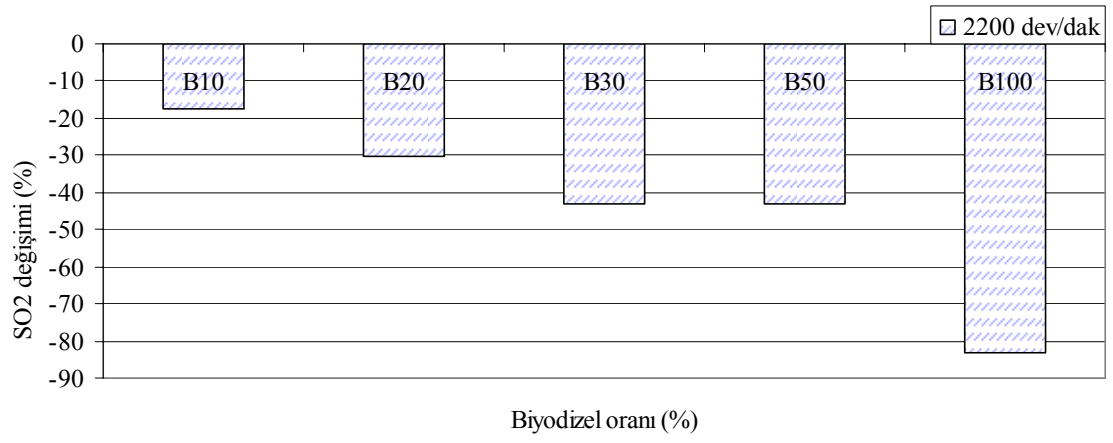
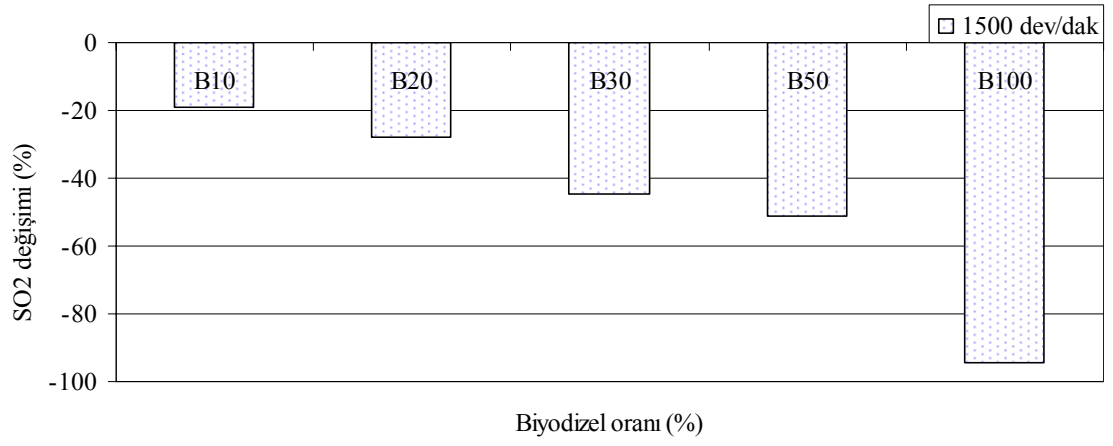
Atık ayçiçeği yağı biyodizelinin ısı değeri dizel yakıt No.2'ye göre yaklaşık %11 daha düşük olmasından dolayı beklendiği gibi biyodizel kullanımı ile genel olarak özgül yakıt tüketimi dizel yakıt No.2'ye göre artış göstermiştir (Şekil 6.10). Karışımdaki biyodizel oranı arttıkça motorun özgül yakıt tüketimi de artmıştır. Sadece B10 karışımı ile özgül yakıt tüketiminde bir miktar azalma görülmüştür. Bu düşme, düşük ısı değerin daha iyi yanma ile karşılanması ile açıklanabilir. Termik verimdeki değişimler ise Şekil 6.11'de verilmiştir. Biyodizel kullanımı ile dizel motor egzoz gaz sıcaklığı ve yağlama yağı sıcaklığındaki değişimler Şekil 6.12 ve 6.13'te verilmektedir. Genel olarak biyodizel kullanımı ile bu sıcaklıklarda az bir miktar artış tespit edilmiştir.



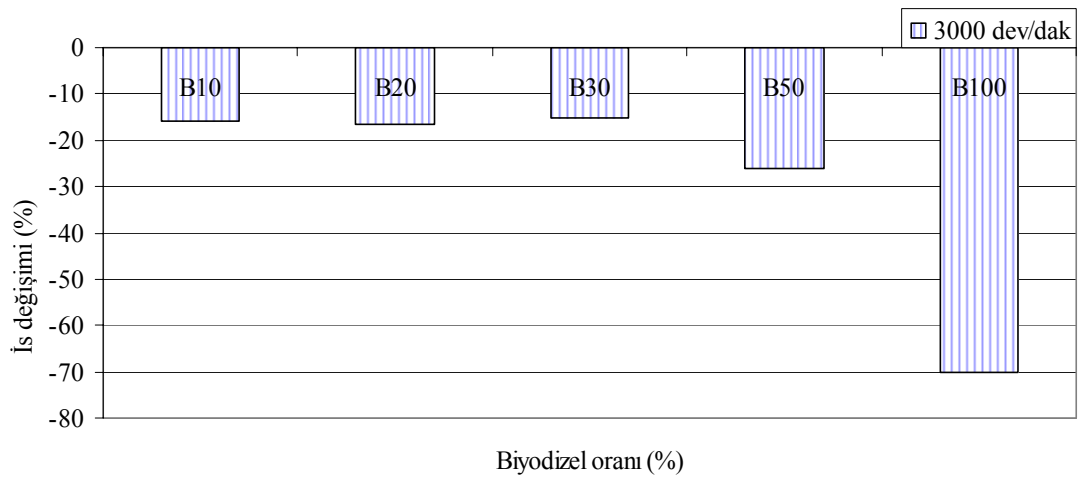
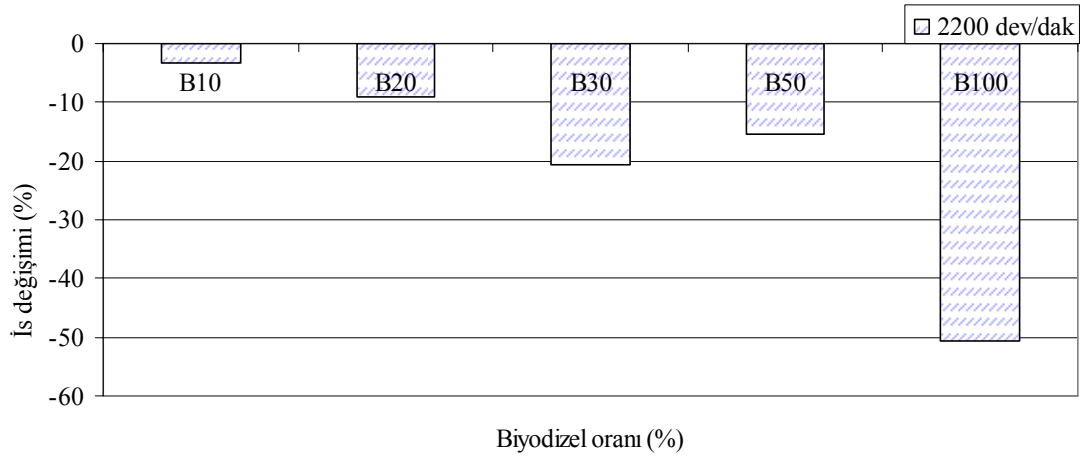
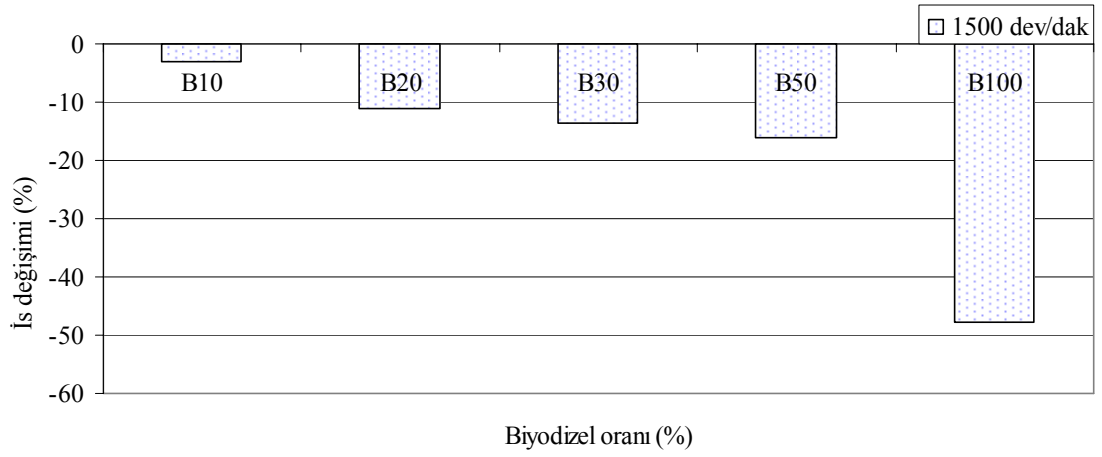
Şekil 6.5 NO emisyon değişimleri



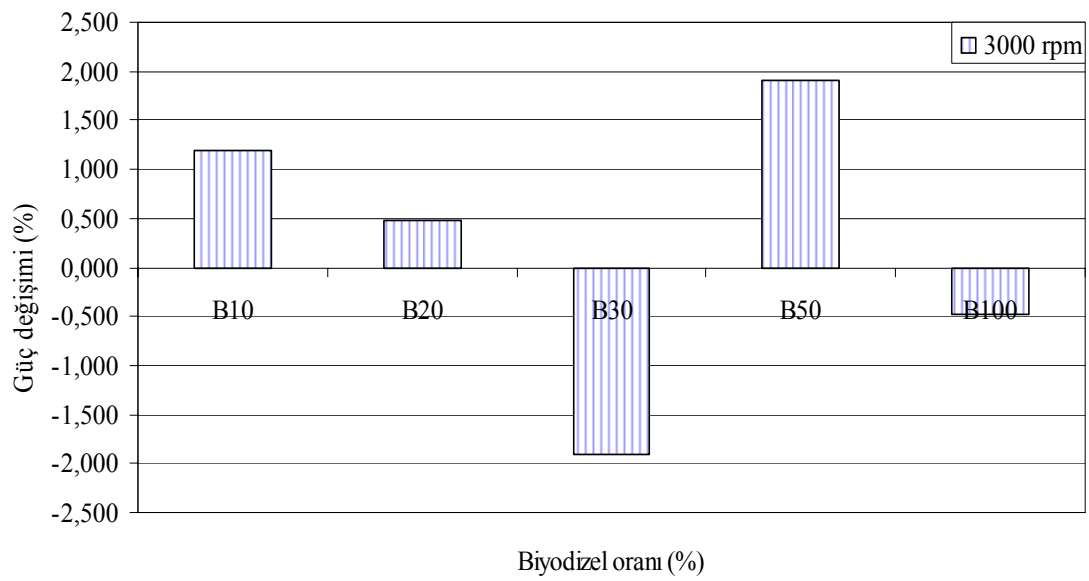
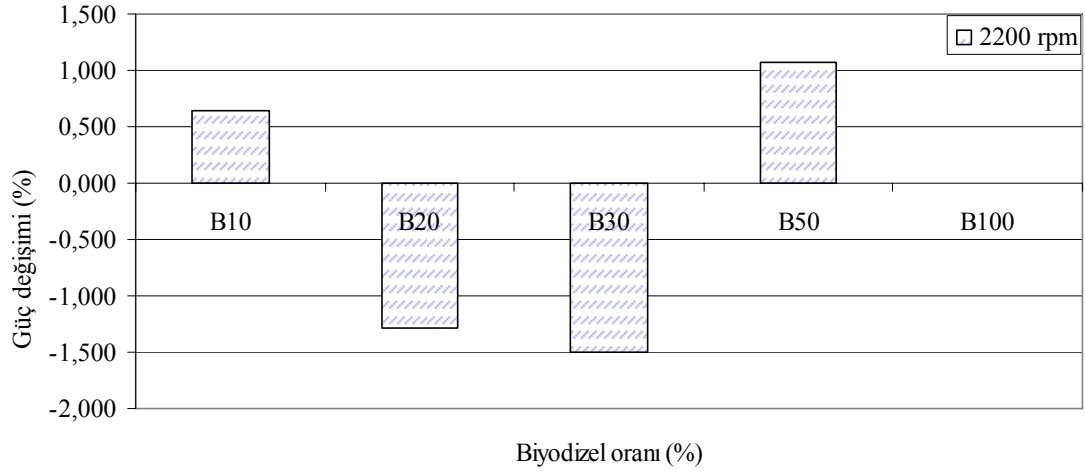
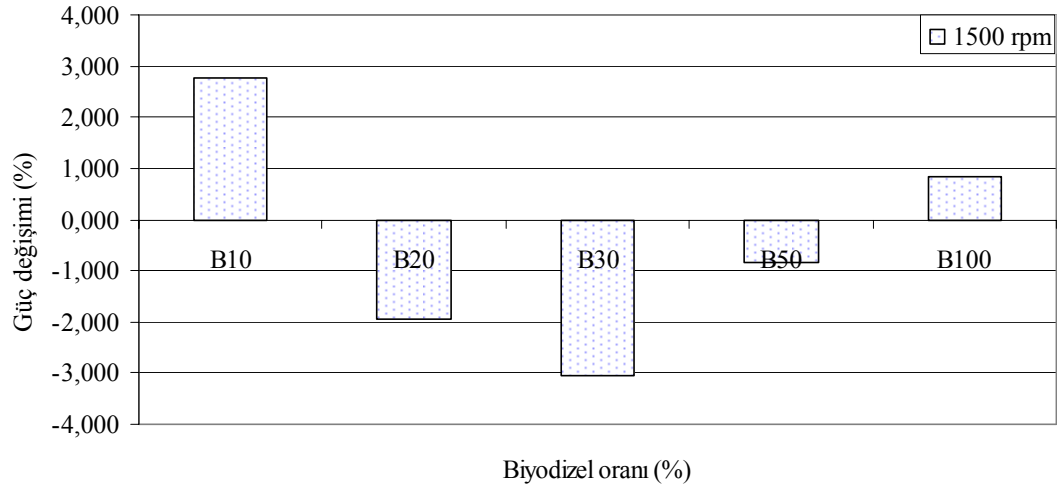
şekil 6.6 CO emisyon değişimi



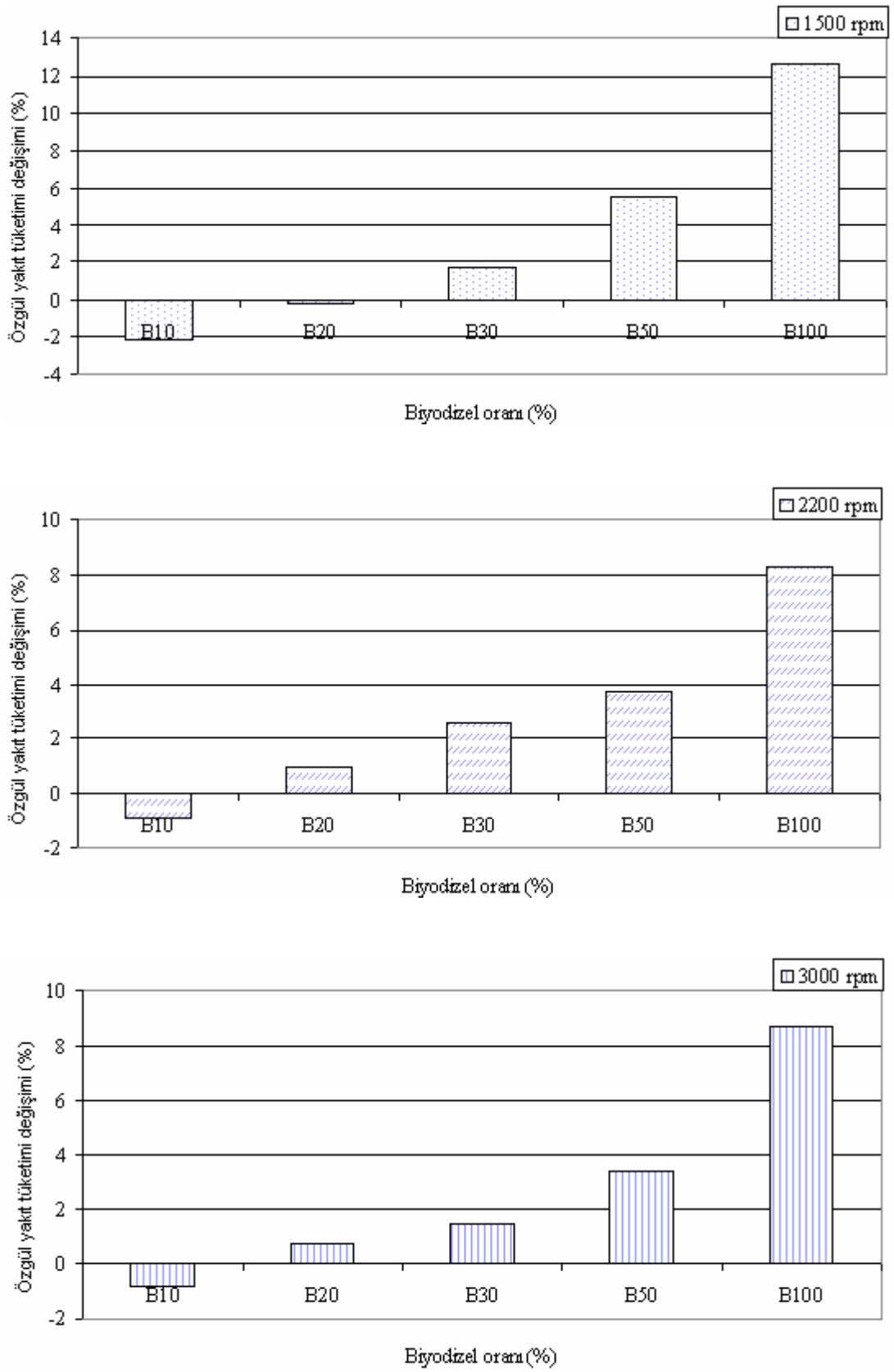
Şekil 6.7 SO₂ emisyon değişimi



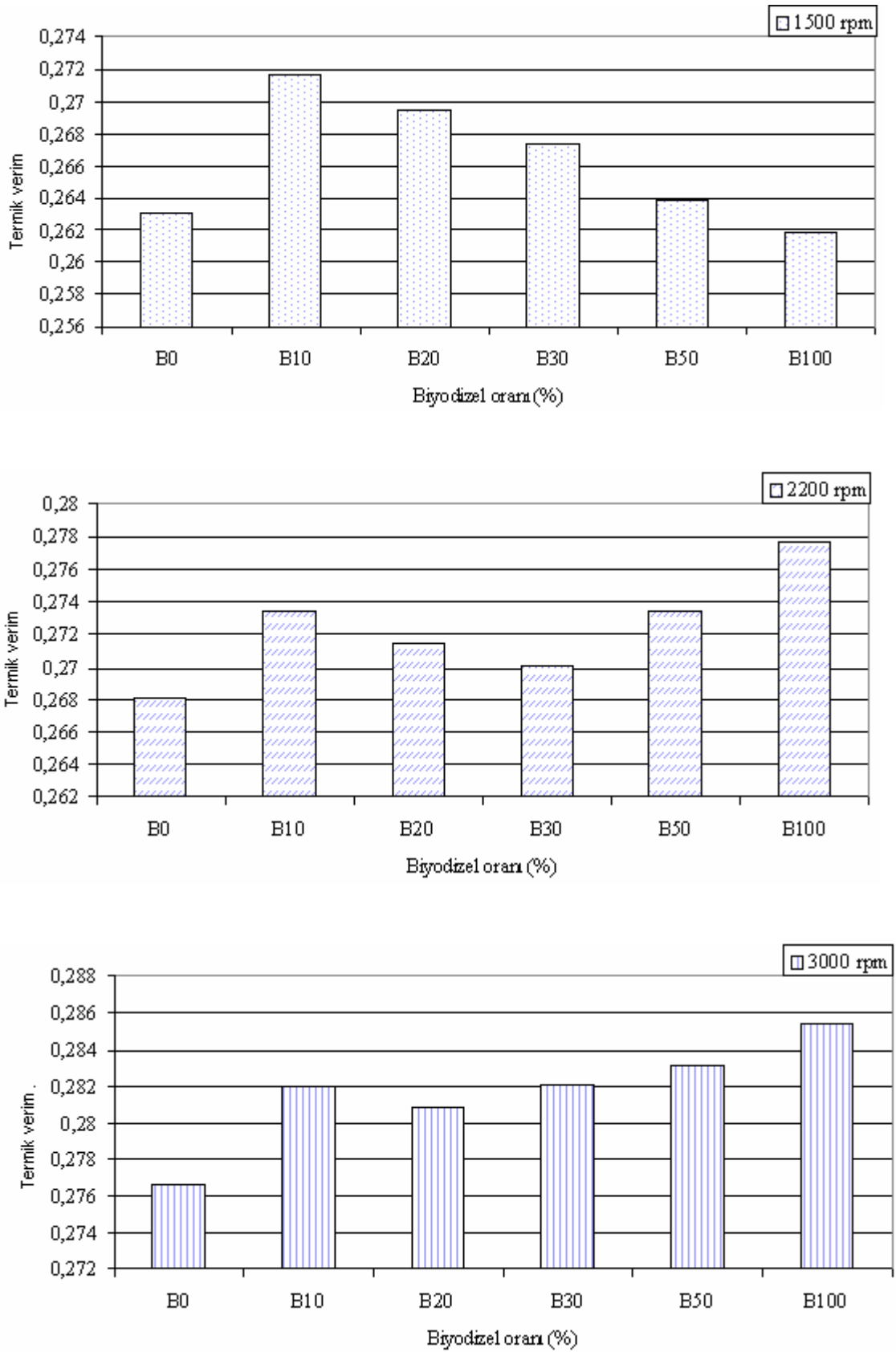
Şekil 6.8 İs emisyon değişimi



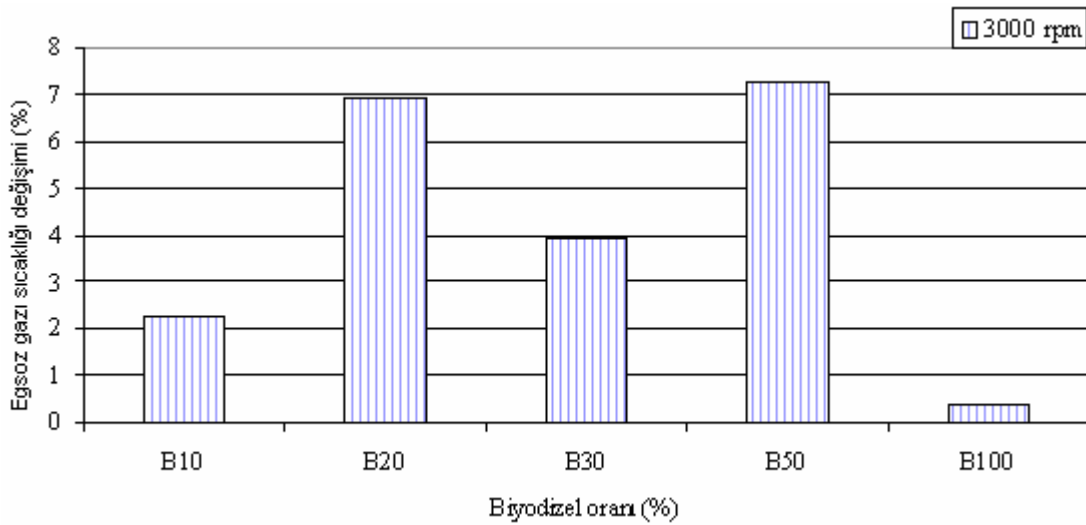
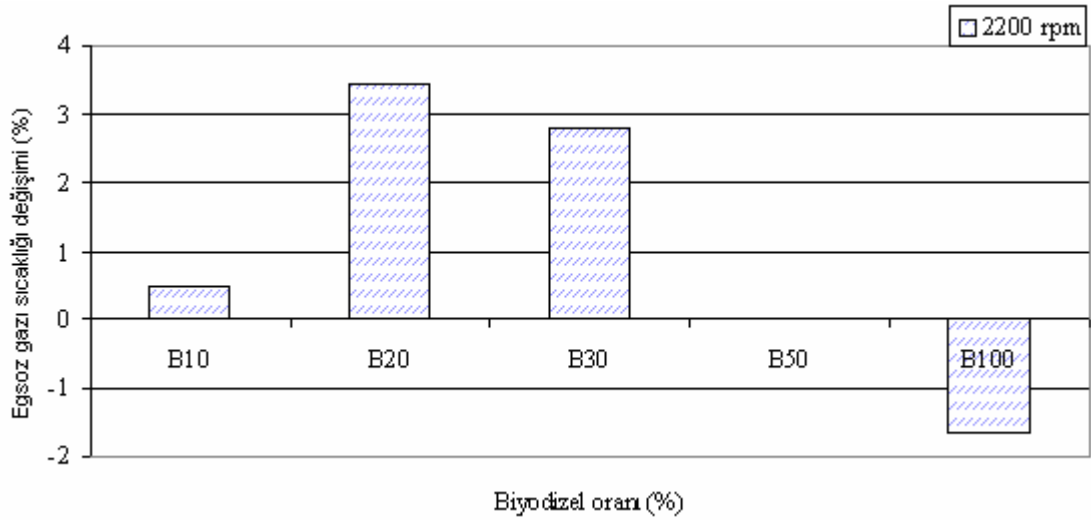
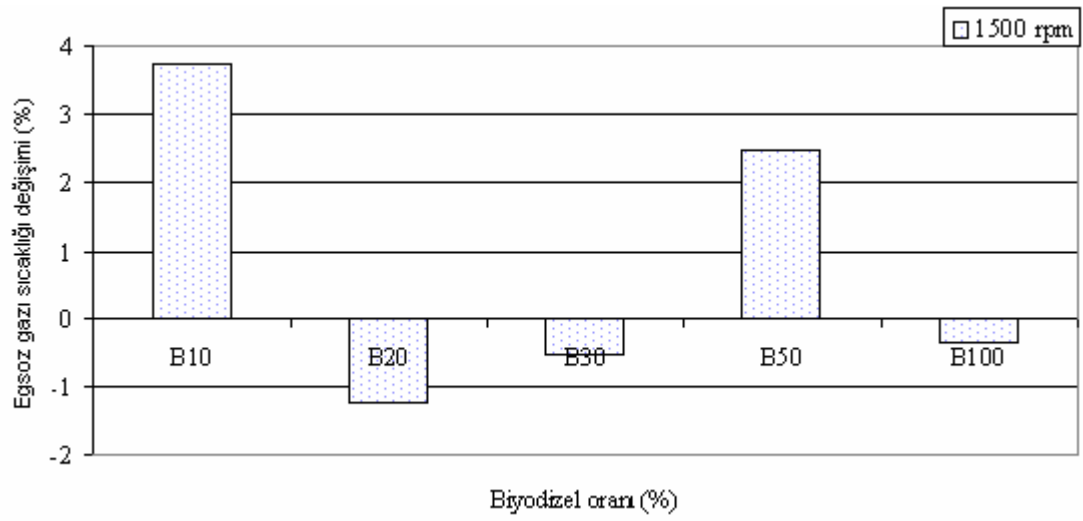
Şekil 6.9 Güç değişimi



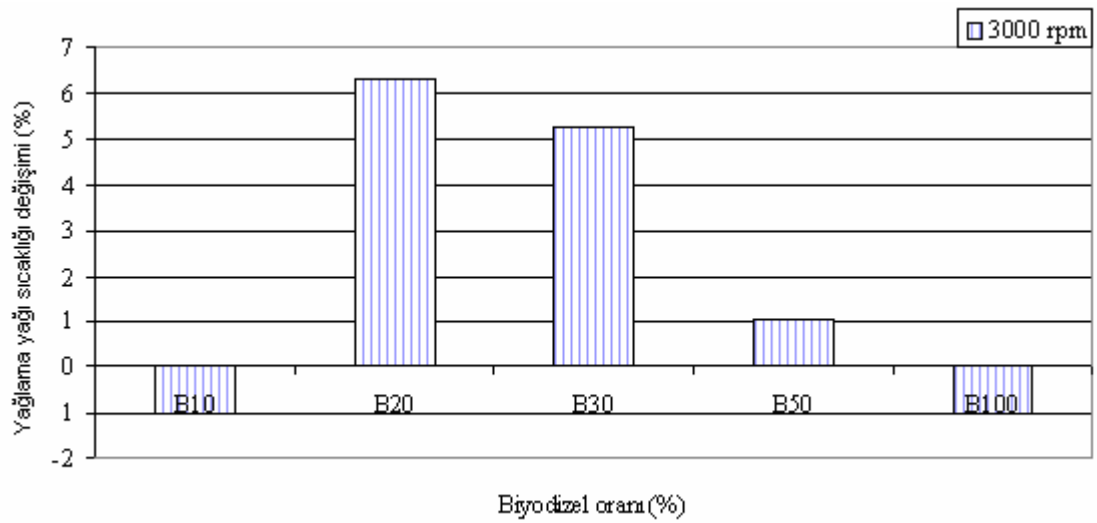
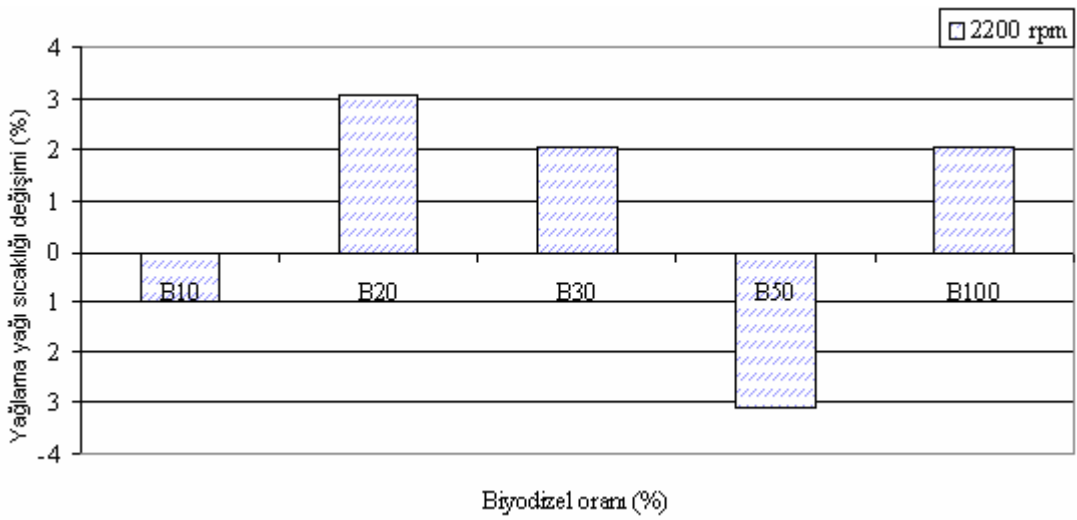
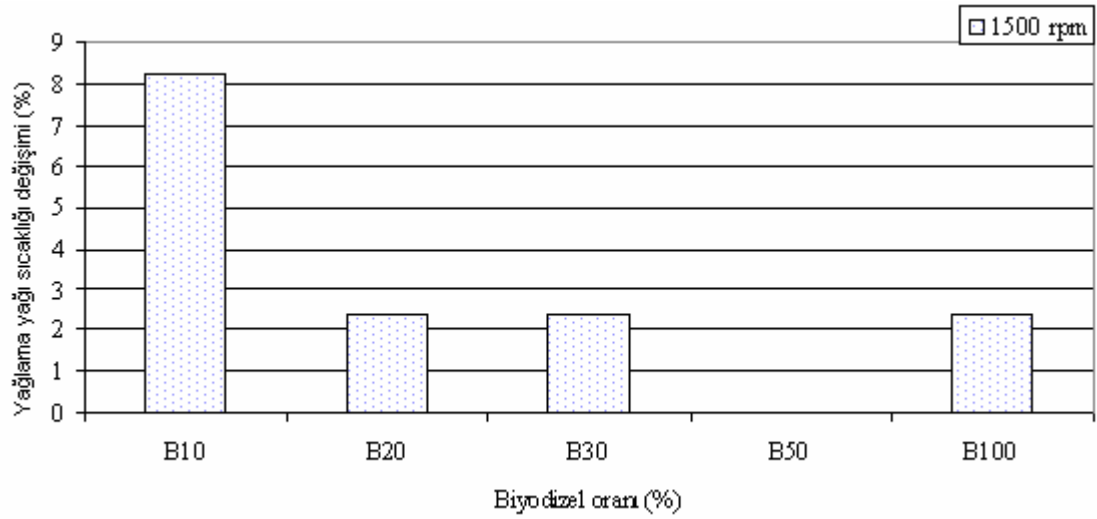
Şekil 6.10 Özgül yakıt tüketimi değişimi



Şekil 6.11 Termik verim değişimi



Şekil 6.12 Egzoz gazı sıcaklığı değişimi



Şekil 6.13 Yağlama yağı sıcaklığı değişimi

7. SONUÇLAR

Bu tezde, dizel motorlar için alternatif yenilenebilir bir yakıt olan biyodizel kullanımının özellikle NO_x emisyonundaki değişimleri üzerine deneysel ve bu emisyonların azaltımı üzerine teorik bir çalışma yapılmıştır. Aynı zamanda biyodizel kullanımının diğer zararlı emisyonlara (CO , is , SO_2) ve motor performans parametrelerine etkileri de incelenmiştir.

Bu çalışmada ham ve rafine kanola yağından, atık ayçiçeği yağından, tütün tohumu yağından ve sabun stoklarından serbest yağ asitlik derecelerine göre asit/baz katalizörlü veya önce asit sonra baz katalizörlü biyodizel üretimleri yapılmıştır. Reaksiyonlarda alkol olarak metanol, asit katalizör olarak sülfürik asit ve baz katalizör olarak NaOH kullanılmıştır. Üretilen bütün biyodizeller hacimsel olarak %5 oranında dizel yakıt No.2'ye ilave edilerek karışımlar oluşturulması yanında atık ayçiçeği yağından üretilen biyodizelin dizel yakıt No.2 ile %10, 20, 30 ve 50 oranlarda karıştırılması sonucu da farklı karışımlar elde edilmiştir. Bütün karışımlar ve atık ayçiçeği yağı biyodizeli ön yanma odalı turbo dizel bir motorda tam yükte ve farklı motor dönme sayılarında test edilmiştir.

Bu çalışmada biyodizel kullanımı ile genel olarak dizel motorun NO_x emisyonlarında farklı oranlarda artış tespit edilmiştir. Artış miktarı karışımdaki biyodizel oranına bağlı olmakla birlikte motorun çalışma şartları ile de ilgilidir. Biyodizelin içeriğindeki yaklaşık olarak kütlece %10 oksijen, yanmayı iyileştirerek CO ve is emisyonlarında azalma sağlarken, NO_x emisyonlarının artmasına sebep olmaktadır. Daha iyi bir yanma silindir içindeki sıcaklığı yükseltmekte bu da ısı NO oluşumunu artırmaktadır. Ayrıca yakıt içerisindeki oksijen de ortamdaki oksijen konsantrasyonunu arttırdığı için yine NO oluşumuna bir miktar yardımcı olmaktadır. Yapılan deneysel çalışmalarda en fazla NO emisyon artışının %100 biyodizel kullanımı ile yaklaşık %5 oranında gerçekleştiği tespit edilmiştir.

Bu tezde, biyodizel kullanımı ile NO_x emisyonlarının azaltımı için geliştirilme aşamasında olan farklı teknikler teorik olarak incelenmiştir. Her tekniğin hem avantaj hem de dezavantajları bulunmaktadır. Bu tekniklerin, motorlarda uygulama aşamasında dikkat edilmesi gereken en önemli nokta NO_x emisyonları düşürülürken diğer

emisyonlarda ve motor performans parametrelerinde dikkate değer kötüleşme olmasının engellenmesidir. Her bir farklı tekniğin optimize edilmesi başlı başına bir tez konusu olabilir. Bu yüzden bundan sonraki çalışmalarda bu teknikler üzerine detaylı çalışmaları içeren tezler yapılabileceği düşünülmektedir.

Biyodizel içerisinde bulunan kükürt miktarının dizel yakıt No.2'ye göre çok düşük olmasından dolayı SO₂ emisyonlarında da karışımdaki biyodizel oranına bağlı olarak dikkate değer bir azalma olmaktadır. Bu da biyodizel yakıtlar için önemli bir avantajdır.

Yapılan deneysel çalışmalarda motor performans parametrelerinde dikkate değer bir değişiklik görülmemiştir. Fakat özgül yakıt tüketimi biyodizel yakıtın ısı değerinin düşük olması nedeniyle %9 ile %13 arasında artış göstermiştir. Motor gücü, egzoz gazı sıcaklığı ve yağlama yağı sıcaklıklarında çok fazla bir değişim görülmemiştir.

Biyodizel kullanımının yaygınlaşmasıyla birlikte endüstriyel tarım gelişme gösterecektir. Motorin standartlarında (TSE 3082 EN 590) dizel yakıt No.2'ye %5 oranında metil ester katılmasına izin verilmesi ve birçok araç firmasının %5 biyodizel kullanımını garanti kapsamına alması biyodizel kullanımının artması yönündeki gelişmelerdir. Fakat ülkemizde yağ ihtiyacının büyük bir kısmının dışardan ithal edilmesi yağlı tohum üreticiliğindeki eksikliği göz önüne sermektedir. Bu da biyodizel üretiminde sıkıntıya neden olmaktadır. Ayrıca biyodizel satışında ÖTV vergisinin belirlenmemesi ve satışına izin verilmemesi nedeniyle ülkemizde biyodizel üretim tesislerini ciddi sıkıntılara sokmaktadır. Yağlı tohum üretimi ve dolayısıyla biyodizel üretiminin desteklenmesi ile iyileşen egzoz emisyon değerleri ile birlikte hem çevre kirliliğinin önleneceği hem de petrol esaslı yakıtların kullanımının azalacağı düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

- Abu-Hamdeh, N. H. (2003) Effect of Cooling The Recirculated Exhaust Gases on Diesel Engine Emissions. *Energy Conversion & Management*, 44: 3113–3124.
- Altın, R., Çetinkaya, S. and Yücesu, H. S. (2000) The Potential Of Using Vegetable Oil Fuels As Fuel for Diesel Engines. *Energy Conversion and Management*, 42: 529-538.
- Altıparmak D., Keskin A., Koca A. and Gürü M. (2007) Alternative fuel properties of tall oil fatty acid methyl ester–diesel fuel blends. *Bioresource Technology*, 98: 241-246.
- ASTM D6751-07b, Standard specification for biodiesel fuel blend stok (B100) for middle distillate fuels. ASTM International 2007.
- Ban-Weiss G. A., Chen J. Y., Buchholz B. A. and Dibble R. W. (2007) A Numerical Investigation into The Anomalous Slight NO_x Increase When Burning Biodiesel; A New (Old) Theory. *Fuel Processing Technology*, 88: 659-667.
- Çanakçı, M. (2007) Combustion Characteristics of A Turbocharged DI Compression Ignition Engine Fueled With Petroleum Diesel Fuels and Biodiesel. *Bioresource Technology*, 98: 1167–1175.
- Çanakçı, M., Erdil, A. and Arcaklıoğlu, E. (2006) Performance and Exhaust Emissions of A Biodiesel Engine. *Applied Energy*, 83: 594–605.
- Challen B. and Baranescu R. (1999) Diesel Engine Reference Book Second Edition. *Butterworth-Heinemann*, Oxford, 686s.
- Cvengros J., Paligová J. and Cvengrosová Z. (2006) Properties of Alkyl Esters Base on Castor Oil. *Eur. J. Lipid Sci. Technol.* 108: 629–635.
- Dunn R. O. (2005) Effect of Antioxidants on The Oxidative Stability of Methyl Soyate. *Fuel Processing Technology*, 86: 1071– 1085.
- Fernando, S., Kara, P., Hernandez, R. and Jha, S. K. (2006) Effect of Incompletely Converted Soybean Oil on Biodiesel Quality. *Energy*, 32: 844-851.
- Graboski M. S. and McCormick R. L. (1997) Combustion of Fat And Vegetable Oil Derived Fuels in Diesel Engines. *Prog. Energy Combust. Sci.*, 24:125-164.
- Haşimoğlu C. ve İcingür Y. (2000) Dizel Motorlarında Azot Oksit (NO_x) Kontrol Yöntemleri. http://www.obitet.gazi.edu.tr/makale/Makaleler/T10_Azotoksit.htm. 15.08.2008

- Haşimoğlu, C., İçingür, Y. ve Ögüt, H. (2002) Dizel Motorlarında Egzoz Gazları Resirkulasyonunun (EGR) Motor Performansı ve Egzoz Emisyonlarına Etkisinin Deneysel Analizi. *Turkish J. Eng. Env. Sci.*, 26: 127-135.
- Hess M. A., Haas M. J., Foglia T. A. and Marmer W. N. (2005) Effect of Antioxidant Addition on NO_x Emissions from Biodiesel. *Energy & Fuels*, 19: 1749-1754.
- Heywood J. B., (1988) Internal Combustion Engine Fundamentals. *Mc Graw-Hill Book Company*, Singapore, 930s.
- Hountalas D.T., Mavrapoulos G. C. and Binder K. B. (2006) Effect of Exhaust Gas Recirculation (EGR) Temperature For Various EGR Rates on Heavy Duty DI Diesel Engine Performance And Emissions. *Energy*, 33: 272-283.
- İçingür Y. and Altıparmak D. (2003) Effect of fuel cetane number and injection pressure on a DI Diesel engine performance and emissions. *Energy Conversion and Management*, 44: 389–397.
- Joshi R. M. and Pegg M. (2007) Flow Properties of Biodiesel Fuel Blends at Low Temperature. *Fuel*, 86: 143– 151.
- Kalam, M. A., Husnawan, M. and Masjuki, H. H. (2003) Exhaust Emission and Combustion Evaluation Of Coconut Oil-Powered Indirect Injection Diesel Engine. *Renewable Energy*, 28: 2405–2415.
- Karabektaş M., Ergen G. and Hosoz M. (2007) The Effects of Preheated Cottonseed Oil Methyl Ester on The Performance and Exhaust Emissions of A Diesel Engine. *Applied Thermal engineering*, baskıda.
- Knothe, G., Sharp, C. A. and Ryan, T. W. (2006) Exhaust Emissions of Biodiesel, Petrodiesel, Neat Methyl Esters, and Alkanes in a New Technology Engine. *Energy&Fuels*, 20: 403-408.
- Korbitz W. (2002) Evaluating & Exploiting the Commercial Uses of Ethanol, Fuel Alcohol & Biodiesel. *New Trends in Developing Biodiesel World-wide*, Singapore, 2002.
- Krahl, J., Bünger, J., Schröder, O., Munack, A. and Knothe, G. (2002) Exhaust Emissions and Health Effects of Particulate Matter from Agricultural Tractors Operating on Rapeseed Oil Methyl Ester. *JAOCs*, 79: 717-725.
- Krisnangkura K., Yimsuwan T. and Pairintra R. (2006) An Empirical Approach in Predicting Biodiesel Viscosity at Various Temperatures. *Fuel*, 85: 107–113.

- Labeckas, G. and Slavinskas, S. (2006) The Effect of Rapeseed Oil Methyl Ester on Direct Injection Diesel Engine Performance and Exhaust Emissions. *Energy Conversion&Management*, 47: 1954–1967.
- Lapuerta M., Armas O. and Rodrigues-Fernandez J., (2008) Effect of Biodiesel Fuels on Diesel Engine Emissions. *Progress in Energy and Combustion Science*, 34: 198–223.
- Lin, Y., Wu, Y. G. and Chang, C. (2007) Combustion Characteristics of Waste-Oil Produced Biodiesel/Diesel Fuel Blends. *Fuel*, 86: 1772-1780.
- Ma F. and Hana M. A. (1999) Biodiesel Production: A Review. *Bioresource Technology*, 70: 1-15.
- Marchetti J.M., Miguel V. U. and Errazu A. F. (2007) Possible Methods For Biodiesel Production. *Renewable&Sustainable Energy Reviews*, 11: 1300-1311.
- McDonnell K. P., Ward S. M. and McNulty P. B. Results of engine and vehicle testing of semi-refined rapeseed oil. *University College Dublin*, Dept of Agricultural & Food Engineering, Ireland, (1999).
- Monyem A. and Gerpen J. H. V. (2001) The Effect of Biodiesel Oxidation on Engine Performance And Emissions. *Biomass and Bioenergy*, 20: 317–325.
- Nabi, N., Akhter, S. and Shahadat, Z. (2006) Improvement of Engine Emissions With Conventional Diesel Fuel And Diesel–Biodiesel Blends. *Bioresource Technology*, 97: 372–378.
- Nitu B., Singh I., Zhong L., Badreshany K. and Henein N. A. (2002) Effect of EGR on Autoignition, Combustion, Regulated Emissions and Aldehydes in DI Diesel Engines. *SAE paper*, 2002-01-1153.
- Prankl H. and Wörgetter M. (1996) Influence of The Iodine Number of Biodiesel To The Engine Performance. *Third Liquid Fuel Conference*, “Liquid Fuels and Industrial Products from Renewable Resources” September 15-17, Nashville, Tennessee.
- Prior A., Jääskeläinen H. and Walsh J. NO_x Emission Study: An Investigation of Water-Based Emission Control Technologies, *Fleetway Inc.*, 2005.
- Puhan, S., Vedaraman, N., Sankaranarayanan, G. and Ram, B. V. B. (2005) Performance and Emission Study of Mahua Oil (Madhuca Indica Oil) Ethyl Ester in A 4-Stroke Natural Aspirated Direct Injection Diesel Engine. *Renewable Energy*, 30: 1269–1278.

- Pulkrabek W. W. (1997) Engineering Fundamentals of The Internal Combustion Engine. *Prentice Hall*, New Jersey, 411s.
- Ramadhas, A. S., Muraleedharan, C. and Jayaraj, S. (2005) Performance and Emission Evaluation Of A Diesel Engine Fueled With Methyl Esters Of Rubber Seed Oil. *Renewable Energy*, 30: 1789–1800.
- Raheman, H. and Ghadge, S. V. (2007). Performance of Compression Ignition Engine With Mahua (Madhuca Indica) Biodiesel. *Fuel*, 86: 2568-2573.
- Safgönül, B., Ergeneman, M., Arslan, E. ve Soruşbay, C. (1999) İçten Yanmalı Motorlar, *Birsen Yayinevi*, İstanbul, 29.
- Sahoo, P. K., Das, L. M., Babu, M. K. G. and Naik, S. N. (2007) Biodiesel Development From High Acid Value Polanga Seed Oil and Performance Evaluation in A CI Engine. *Fuel*, 86: 448-454.
- Senzikiene, E., Makareviciene, V. and Janulis, P. (2006) Influence of Fuel Oxygen Content on Diesel Engine Exhaust Emissions. *Renewable Energy*, 31: 2505–2512.
- Shaid E. M. and Jamal Y., (2008) A Review of Biodiesel as Vehicular Fuel. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, baskıda.
- Shi, X., Pang, X., Mu, Y. He, H., Shuai, S., Wang, J., Chen, H. and Li, R. (2006) Emission Reduction Potential of Using Ethanol–Biodiesel–Diesel Fuel Blend on A Heavy-Duty Diesel Engine. *Atmospheric Environment*, 40: 2567–2574.
- Tat M. E. (2003) Investigation of Oxides of Nitrogen Emissions From Biodiesel-Fueled Engines. Ph. D. *Iowa State University*, 41.
- Tate R. E., Watss K. C., Allen C.A.W. and Wilkie K.I. (2006) The Densities of Three Biodiesel Fuels at Temperatures Up To 300 °C. *Fuel*, 85: 1004–1009.
- Tate R. E., Watss K. C., Allen C.A.W. and Wilkie K.I. (2005) The Viscosities of Three Biodiesel Fuels At Temperatures Up To 300 °C. *Fuel*, 85: 1010-1015.
- TSE Otomotiv yakıtları - Dizel (motorin), Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2005.
- TS EN 14214, Otomotiv yakıtları – Yağ Asidi Metil Esterleri, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2005.
- Tsolakis, A., Megaritis, A., Wyszynski, M. L. and Theinnoi, K. (2007) Engine Performance and Emissions of A Diesel Engine Operating On Diesel-RME (Rapeseed Methyl Ester) Blends With EGR (Exhaust Gas Recirculation). *Energy*, 32: 2072-2080.
- Ulusoy, Y., Tekin, Y., Çetinkaya, M. and Karaosmanoğlu, F. (2004) The Engine Tests of Biodiesel from Used Frying Oil. *Energy Sources*, 26: 927–932.

- Usta N., Öztürk E., Can Ö., Conkur E. S., Nas S., Çon A. H., Can A. Ç. and Topcu M. (2005) Combustion of Biodiesel Fuel Produced From Hazelnut Soapstock/Waste Sunflower Oil Mixture in A Diesel Engine. **Energy Conversion&Management**, 46: 741-755.
- Utlü Z. and Koçak M. S. (2008) The Effect of Biodiesel Fuel Obtained From Waste Frying Oil on Direct Injection Diesel Engine Performance and Exhaust Emissions. **Renewable Energy**, 33: 1936-1941.
- WEB_1. (2008). http://www.petder.org.tr/Yayinlar/publication_report_2007.asp (15.06.2008)
- WEB_2. (2008). <http://www.petrol-is.org.tr/arastirmalar.html> (15.06.2008)
- WEB_3. (2008). <http://www.aeri.org.tr/> (15.06.2008)
- WEB_4. (2008). <http://www.emerging-markets.com/> (15.06.2008)
- WEB_5. (2008). www.biodiesel.org/pdf_files/fuelfactsheets/BDSpec.pdf (12.06.2008)
- WEB_6. (2008). [http://www.asabe.org/awards/competitions/2005 Graduate Winners/Research Paper.pdf](http://www.asabe.org/awards/competitions/2005_Graduate_Winners/Research_Paper.pdf) (16.06.2008)
- WEB_7. (2008). http://www.catalyticexhaust.ca/products_page4.html (15.06.2008)
- WEB_8. (2008). <http://www.autoshop101.com/> (15.06.2008)
- WEB_9. (2008). www.rederi.no/default.asp?FILE=items/2817/263/7%20Bertholom%20HAM.pdf (16.06.2008)
- Wyatt. V. T., Hess, M. A., Dunn, R. O., Foglia, T. A., Haas, M. J. and Marmer, V. N. (2005) Fuel Properties and Nitrogen Oxide Emission Levels of Biodiesel Produced from Animal Fats. **JAOCs**, 82: 585-592.
- Wu Y. G., Lin y. and Chang C. (2007) Combustion Characteristics of Fatty Acid Methyl Esters Derived From Recycled Cooking Oil. **Fuel**, 86: 2810-2816.
- Xiaoyan S., Yunbo Y., Hong H., Shijin S., Hongyi D. and Rulong L. (2008) Combination Of Biodiesel-Ethanol-Diesel Fuel Blend and SCR Catalyst Assembly To Reduce Emissions From A Heavy-Duty Diesel Engine. **Journal of Environmental Sciences**, 20: 177–182.
- Zheng M., Mulenga M. C., Reader G. T., Wang M., Tink D. S. K. and Tjong J. (2008) Biodiesel Engine Performance and Emissions in Low Temperature Combustion. **Fuel**, 87: 714-722.
-

ÖZGEÇMİŞ

Adı, soyadı	: Bilal AYDOĞAN
Ana adı	: Yurdagül
Baba adı	: Mehmet
Doğum yeri ve tarihi	: Acıpayam/08.06.1980
Lisans eğitimi ve mezuniyet tarihi	: Kocaeli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü - 2003
Çalıştığı yer	: Pamukkale Üniversitesi Tübitak Projesi
Bildiği yabancı dil	: İngilizce