

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ÇEŞİTLİ ALTERNATİF YAKITLARIN DİZEL MOTORU
EMİSYONLARINA ETKİLERİNİN TEORİK VE DENEYSEL
İNCELENMESİ

90796-

Cumali İLKILIÇ

DOKTORA TEZİ
MAKİNE EĞİTİMİ ANABİLİM DALI

ELAZIĞ
1999

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ÇEŞİTLİ ALTERNATİF YAKITLARIN DİZEL MOTORU EMİSYONLARINA
ETKİLERİNİN TEORİK VE DENEYSEL İNCELENMESİ**

Cumali İLKILIÇ

DOKTORA TEZİ
MAKİNE EĞİTİMİ ANABİLİM DALI

Bu tez 17. 12. 1999 tarihinde, aşağıda belirtilen jüri tarafından oybirliği ile başarılı olarak değerlendirilmiştir.

(imza)

Danışman
Y. Doç. Dr. H. Serdar YÜCESU

(imza)

Üye
Doç. Dr. Cengiz YILDIZ

(imza)

Üye
Prof. Dr. Veli ÇELİK

T.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU
DOKÜMANTASYON MERKEZİ

ÖZET

Doktora Tezi

**ÇEŞİTLİ ALTERNATİF YAKITLARIN DİZEL MOTORU EMİSYONLARINA
ETKİLERİNİN TEORİK VE DENEYSEL İNCELENMESİ**

Cumali İLKILIÇ

Fırat Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Eğitimi Anabilim Dalı

1999, Sayfa : 158

Gelişen teknoloji ile beraber motorlu taşıtların sayısı da artış göstermektedir. Bu artışın sonucunda motorlu araçların yakıt ihtiyaçları da artmaktadır. Yakıt rezervlerinin sınırlı olması ve bu yakıtlardan kaynaklanan hava kirliliği de son derece önemli problemler haline gelmiştir, alternatif yakıtların araştırılmasının önemi gün geçtikçe artmaktadır. İçten yanmalı motorlarda bitkisel yağların kullanılabilirliği çalışmaları daha önceden de yapılmıştır.

Türkiye endüstrileşmenin yanında bir tarım ülkesi olduğu için, bitkisel yağların dizel yakıtı olarak kullanılması halinde tarım alanlarına işlerlik kazandıracak ve büyük ekonomik yararlar sağlayacaktır.

Bu çalışmanın birinci bölümü, bitkisel yağların alternatif dizel yakıtı olarak kullanılması üzerinde yoğunlaşmıştır. İkinci bölümünde bitkisel yağların kimyasal ve fiziksel özelliklerinin dizel yakıtı özelliklerine yaklaştırmak amacıyla, ayçiçek ve pamuk yağının metil esterleri hazırlanmıştır. Çalışmanın esas bölümünde, tek silindirli bir dizel motorunda dizel yakıtı, ayçiçek ve pamuk yağının metil esterleri denenmiştir. Dizel yakıtına hacimsel olarak %50 pamuk ve ayçiçek yağı metil esterleri karıştırılmış ve ayrıca bu esterler %100 saflıkta kullanılmıştır. Tam gaz, değişik enjeksiyon basıncı ve çeşitli devirlerde denenmiş olan bu yakıtların motor performansı ile egzoz emisyon ürünleri üzerindeki etkisi karşılaştırılmıştır. Yapılan karşılaştırmada, düşük enjeksiyon basınçlarında pamuk ile

ayçiçek yağı metil esterleri dizel yakıtına eşit ve diğer basınçlarda ise dizel yakıtına yakın güç ve moment değerleri vermektedir. Bütün enjeksiyon basınçlarında da ayçiçek ve pamuk yağı metil esterinin dizel yakıtına oranla daha düşük emisyon ürünü verdikleri görülmektedir. Bunun için, bu yağların metil esterinin özellikle çevre bakımından dizel yakıtına alternatif olabileceği sonucuna varılmıştır.

Sonuç olarak ayçiçek ve pamuk yağı ile diğer bitkisel yağların metil esterleri veya bu esterlerin dizel yakıtı ile belli oranlarda karışımları literatürde yapılan benzeri çalışmalar ile uygunluk içinde olduğu görülmektedir. Pamuk ve ayçiçek yağı metil esterleri emisyon ürünlerinin dizel yakıtına oranla daha az olduğu görülmüştür.

Anahtar kelimeler: Bitkisel yağlar, Ayçiçek yağı, Pamuk yağı, Yağ asidi metil esteri, Dizel motorları egzoz emisyonları, Emisyon ölçümleri.

ABSTRACT

PhD. Thesis

**THEORETICAL AND EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE EFFECTS
OF DIFFERENT ALTERNATIVE FUELS ON THE EMISSION OF DIESEL
ENGINES**

Cumali İLKILIÇ

Fırat University

Institute of Science and Technology

Mechanical Education Department

1999, Page: 158

Motor vehicles are increasing with the improving technology. Thus the fuel amount consumed is also increasing. Since the fuel sources are limited and these fuels cause air pollution to become serious environment problem, the studies on alternative fuels have been gaining importance. Recent studies showed that vegetable oils could be used as alternative fuels in internal combustion engines.

Because Turkey is an agricultural country besides being an industrialized one, in case of vegetable oils used as diesel fuel, it is clear that it will give big economical savings and gains in agriculture.

The first chapter of this study is focused on the use of vegetable oils as alternative fuel. In the second chapter methyl esters of sunflower and cotton seed oils are prepared in order of their properties to be similar to of diesel fuel. In the experimental study diesel fuel, the methyl esters of sunflower and cotton seed oils were investigated on the single cylinder diesel engine. The methyl esters of sunflower and cotton seed oils were added to diesel fuel in the rate of 50 percent. In addition these esters were used %100 purely. The effects of these fuels on the engine performances and the products of exhaust emissions were compared in case of fully open throttle, at different injection pressures and in different engine speed.

From the comparisons it was seen that at lower injection pressures, methyl esters of sunflower and cotton seed oils gave a torque and engine power equal to the diesel fuel and at the other pressures a torque and power close to the diesel fuel. The products of emission methyl esters of these oils were lower than of diesel fuel at all pressures. As a result it was understood that methyl esters of these oils could be used as alternative to diesel fuel.

As a result, the result obtained from the use of methyl esters of sunflower and cotton seed oils are seen to be a good consistent with the ones in the literature. The products of emissions of methyl esters of sunflower and cotton seed oils are lower than of diesel fuels.

Key words: Alternative fuel, Vegetable oils, Sunflower oil, Cotton seed oil, Oil acid methyl ester, Diesel engines exhaust emissions, Emission measures.



TEŞEKKÜR

Bu çalışma konusunu tespit etmede yardımcı olan ve danışmanlığımı üstlenen aynı zamanda çalışmalarına yön veren tez danışmanım Y. Doç. Dr. H. Serdar YÜCESU'ya, çalışmalarım sırasında deney düzeneğinin hazırlanmasında her türlü yardımını esirgemeyen Y. Doç. Dr. Cengiz ÖNER ve Dr. Hasan BAYINDIR'a, gerekli olan yağ esterlerini hazırlamakta her türlü yardımını esirgemeyen Fen Edebiyat Fakültesi Kimya Bölümü öğretim üyesi Y. Doç. Dr. Fikret KARATAŞ'a, yardımlarını gördüğüm motor ve metal atelyeleri teknisyenlerine, emeği geçen diğer arkadaşlarım ile tüm çalışmalarım sırasında her türlü desteğini esirgemeyen eşim ile biyolog kardeşim Tekin İLKILIÇ'a teşekkürlerimi sunarım.

Cumali İLKILIÇ

Kasım 1999 ELAZIĞ

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
Özet	III
Abstract	V
Teşekkür	VII
İçindekiler	VIII
Şekiller	XI
Simgeler	XVI
1. GİRİŞ	1
1.1. Petrol ve Önemi	1
1.2. Dizel Motorlarında Alternatif Yakıt Olarak Bitkisel Yağ Kullanımı	5
2. DİZEL MOTORLARDA KİRLETİCİ EMİSYONLARIN OLUŞUMU	12
2.1. Dizel Motorlarında Yanma	12
2.2. Dizel Motorlarında Kirletici Emisyonlar	15
2.1.1. Kirletici gaz emisyonları	17
2.2.1.1. Azot oksit emisyonları	17
2.2.1.2. Karbonmonoksit emisyonları	20
2.2.1.3. Hidrokarbon (HC) emisyonları	22
2.1.2. Partikül emisyonları ve etkileri	27
2.1.2.1. Partikül emisyonları	28

3. DİZEL MOTORLARINDA YANMA ve EGZOZ EMİSYONLARININ TEORİK İNCELENMESİ	33
3.1. Teorik Çalışmalarda Yapılan Kabuller	33
3.1.1. Silindir içinde yanma işlemi	35
3.1.2. Emisyon ürünlerinin teorik hesaplanması	36
3.1.3. Azot oksit (NO _x) emisyonları	38
3.1.4. Karbonmonoksit emisyonları	43
3.1.5. Hidrokarbon emisyonları	45
3.1.6. Partikül emisyonları	49
4. MATERYAL ve METOD	52
4.1. Bitkisel Yağlar	52
4.2. Ayçiçek ve Pamuk Yağı	53
4.3. Ayçiçek ve Pamuk Yağı Metil Esterinin Hazırlanması	54
4.4. Ayçiçek ve Pamuk Yağından Ester Elde Edilmesi	55
4.5. Deney Yakıtlarının Kimyasal ve Fiziksel Özellikleri	58
4.6. Deneyde Kullanılan Cihazlar	58
4.6.1. Dinamometre	58
4.6.2. Hava tüketimi ölçüm sistemi	59
4.6.3. Yakıt tüketiminin ölçülmesi	60
4.6.4. Gaz analiz cihazı	60
4.6.5. Kronometre	61
4.6.6. Deneyde kullanılan yakıtlar	61
4.6.7. Deneyde kullanılan motorun teknik özellikleri	61
4.7. Deney Seti	62
4.7.1. Deneyin yapılışı	62

5. DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA	63
5.1. Moment Değişimi	63
5.2. Motor Gücü	69
5.3. Özgül Yakıt Tüketimi	75
5.4. Karbonmonoksit (CO) Emisyonu	80
5.5. Karbondioksit (CO ₂) Emisyonları	86
5.6. Azotoksit (NO _x) Emisyonları	91
5.7. Oksijen (O ₂) Miktarı	96
5.8. Hava Fazlalık Katsayısı	101
5.9. Duman Koyuluğu	106
6. SONUÇ VE ÖNERİLER	109
KAYNAKLAR	113
Ek - 1. Sabit Devir Bar Grafikleri	119
Ek - 2. 100D, 50PE50D, 50AE50D, 100PE ve 100AE Yakıtlarının tam gaz ve değişik motor devirlerindeki performans ve egzoz emisyon ürünleri değerleri	124

ŞEKİLLER LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Şekil 2. 1. Dizel motorlarında ön karışım sırasında kirleticilerin oluşum mekanizması	16
Şekil 2. 2. Dizel motorlarında kontrollü karışım sırasında kirleticilerin oluşum mekanizması .	16
Şekil 2. 3. Bir dizel motorunda gaz (NO_x , CO, CO_2 , HC) ve partikül emisyonu konsantrasyonlarının krank açısına göre değişimi	19
Şekil 2. 4. Eşdeğer oranına bağlı olarak NO_x ve NO konsantrasyonlarının değişimi	20
Şekil 2. 5. Tutuşma gecikmesi peryodunda püskürtülen yakıtın HC mekanizmasının şematik gösterilişi	24
Şekil 2. 6. Yanma sırasında püskürtülen yakıtın HC oluşum mekanizması şematik gösterilişi	25
Şekil 2. 7. HC emisyonlarının hava fazlalık katsayısı ile değişimi	26
Şekil 2. 8. Dizel egzoz partikülünün kimyasal yapısı	28
Şekil 2. 9. Karbon partikülünün yapısı	29
Şekil 2. 10. Silindir içindeki partikül oluşumunun şematik olarak gösterilmesi	30
Şekil 2. 11. Türbülans yayılmalı alevde kurumun oluşum ve oksidasyonu	31
Şekil 2. 12. Molar kütlenin, hidrojenin mol kesirinin değişiminden kurum oluşum yolları	32
Şekil 5. 1. Değişik devirlerde tam gaz ve 150 bar enjeksiyon basıncında 100D, 50PE50D, 50AE50D, 100PE ve 100AE yakıtlarının moment değişimleri	64
Şekil 5. 2. Değişik devirlerde tam gaz ve 175 bar enjeksiyon basıncında 100D, 50PE50D, 50AE50D. 100PE ve 100AE yakıtlarının moment değişimleri	64
Şekil 5. 3. Değişik devirlerde tam gaz ve 200 bar enjeksiyon basıncında 100D, 50PE50D, 50AE50D. 100PE ve 100AE yakıtlarının moment değişimleri	65
Şekil 5. 4. Değişik devirlerde tam gaz ve 225 bar enjeksiyon basıncında 100D, 50PE50D, 50AE50D. 100PE ve 100AE yakıtlarının moment değişimleri	66
Şekil 5. 5. Değişik devirlerde tam gaz ve 250 bar enjeksiyon basıncında 100D, 50PE50D, 50AE50D, 100PE ve 100AE yakıtlarının moment değişimleri	67

Şekil 5. 6. Sabit devir, tam gaz ve değişik enjeksiyon basınçlarında 100D, 50PE50D, 50AE50D, 100PE ve 100AE yakıtlarının moment değişimleri	68
Şekil 5. 7. Değişik devirlerde tam gaz ve 150 bar enjeksiyon basıncında 100D, 50PE50D, 50AE50D, 100PE ve 100AE yakıtlarının güç değişimleri	70
Şekil 5. 8. Değişik devirlerde tam gaz ve 175 bar enjeksiyon basıncında 100D, 50PE50D, 50AE50D, 100PE ve 100AE yakıtlarının güç değişimleri	70
Şekil 5. 9. Değişik devirlerde tam gaz ve 200 bar enjeksiyon basıncında 100D, 50PE50D, 50AE50D, 100PE ve 100AE yakıtlarının güç değişimleri	71
Şekil 5. 10. Değişik devirlerde tam gaz ve 225 bar enjeksiyon basıncında 100D, 50PE50D, 50AE50D, 100PE ve 100AE yakıtlarının güç değişimleri	72
Şekil 5. 11. Değişik devirlerde tam gaz ve 250 bar enjeksiyon basıncında 100D, 50PE50D, 50AE50D, 100PE ve 100AE yakıtlarının güç değişimleri	73
Şekil 5. 12. Sabit devir, tam gaz ve değişik enjeksiyon basınçlarında 100D, 50PE50D, 50AE50D, 100PE ve 100AE yakıtlarının güç değişimleri	74
Şekil 5. 13. Değişik devirlerde tam gaz ve 150 bar enjeksiyon basıncında 100D, 50PE50D, 50AE50D, 100PE ve 100AE yakıtlarının özgül yakıt tüketimi	76
Şekil 5. 14. Değişik devirlerde tam gaz ve 200 bar enjeksiyon basıncında 100D, 50PE50D, 50AE50D, 100PE ve 100AE yakıtlarının özgül yakıt tüketimi	77
Şekil 5. 15. Değişik devirlerde tam gaz ve 250 bar enjeksiyon basıncında 100D, 50PE50D, 50AE50D, 100PE ve 100AE yakıtlarının özgül yakıt tüketimi	78
Şekil 5. 16. Sabit devir, tam gaz ve değişik enjeksiyon basınçlarında 100D, 50PE50D, 50AE50D, 100PE ve 100AE yakıtlarının özgül yakıt tüketimi değişimleri	79
Şekil 5. 17. Değişik devirlerde tam gaz ve 150 bar enjeksiyon basıncında 100D, 50PE50D, 50AE50D, 100PE ve 100AE yakıtlarının CO değişimleri	80
Şekil 5. 18. Değişik devirlerde tam gaz ve 175 bar enjeksiyon basıncında 100D, 50PE50D, 50AE50D, 100PE ve 100AE yakıtlarının CO değişimleri	81

Şekil 5. 19.	Değişik devirlerde tam gaz ve 200 bar enjeksiyon basıncında 100D, 50PE50D, 50AE50D, 100PE ve 100AE yakıtlarının CO değişimleri	82
Şekil 5. 20.	Değişik devirlerde tam gaz ve 225 bar enjeksiyon basıncında 100D, 50PE50D, 50AE50D, 100PE ve 100AE yakıtlarının CO değişimleri	83
Şekil 5. 21.	Değişik devirlerde tam gaz ve 250 bar enjeksiyon basıncında 100D, 50PE50D, 50AE50D, 100PE ve 100AE yakıtlarının CO değişimleri	83
Şekil 5. 22.	Sabit devir, tam gaz ve değişik enjeksiyon basınçlarında 100D, 50PE50D, 50AE50D, 100PE ve 100AE yakıtlarının karbonmonoksit (CO) değişimleri	85
Şekil 5. 23.	Değişik devirlerde tam gaz ve 150 bar enjeksiyon basıncında 100D, 50PE50D, 50AE50D, 100PE ve 100AE yakıtlarının CO ₂ değişimleri	86
Şekil 5. 24.	Değişik devirlerde tam gaz ve 175 bar enjeksiyon basıncında 100D, 50PE50D, 50AE50D, 100PE ve 100AE yakıtlarının CO ₂ değişimleri	87
Şekil 5. 25.	Değişik devirlerde tam gaz ve 200 bar enjeksiyon basıncında 100D, 50PE50D, 50AE50D, 100PE ve 100AE yakıtlarının CO ₂ değişimleri	88
Şekil 5. 26.	Değişik devirlerde tam gaz ve 225 bar enjeksiyon basıncında 100D, 50PE50D, 50AE50D, 100PE ve 100AE yakıtlarının CO ₂ değişimleri	88
Şekil 5. 27.	Değişik devirlerde tam gaz ve 250 bar enjeksiyon basıncında 100D, 50PE50D, 50AE50D, 100PE ve 100AE yakıtlarının CO ₂ değişimleri	89
Şekil 5. 28.	Sabit devir, tam gaz ve değişik enjeksiyon basınçlarında 100D, 50PE50D, 50AE50D, 100PE ve 100AE yakıtlarının karbondioksit (CO ₂) değişimleri	90
Şekil 5. 29.	Değişik devirlerde tam gaz ve 150 bar enjeksiyon basıncında 100D, 50PE50D, 50AE50D, 100PE ve 100AE yakıtlarının NO _x değişimleri	92
Şekil 5. 30.	Değişik devirlerde, tam gaz ve 175 bar enjeksiyon basıncında 100D, 50PE50D, 50AE50D, 100PE ve 100AE yakıtlarının NO _x değişimleri	92
Şekil 5. 31.	Değişik devirlerde, tam gaz ve 200 bar enjeksiyon basıncında 100D, 50PE50D, 50AE50D, 100PE ve 100AE yakıtlarının NO _x değişimleri	93
Şekil 5. 32.	Değişik devirlerde, tam gaz ve 225 bar enjeksiyon basıncında 100D, 50PE50D, 50AE50D, 100PE ve 100AE yakıtlarının NO _x değişimleri	94

Şekil 5. 33. Değişik devirlerde, tam gaz ve 225 bar enjeksiyon basıncında 100D, 50PE50D, 50AE50D, 100PE ve 100AE yakıtlarının NO_x değişimleri	94
Şekil 5. 34. Sabit devir, tam gaz ve değişik enjeksiyon basınçlarında 100D, 50PE50D, 50AE50D, 100PE ve 100AE yakıtlarının azotoksit (NO_x) değişimleri	95
Şekil 5. 35. Değişik devirlerde, tam gaz ve 150 bar enjeksiyon basıncında 100D, 50PE50D, 50AE50D, 100PE ve 100AE yakıtlarının oksijen (O_2) değişimleri	97
Şekil 5. 36. Değişik devirlerde, tam gaz ve 175 bar enjeksiyon basıncında 100D, 50PE50D, 50AE50D, 100PE ve 100AE yakıtlarının oksijen (O_2) değişimleri	97
Şekil 5. 37. Değişik devirlerde, tam gaz ve 200 bar enjeksiyon basıncında 100D, 50PE50D, 50AE50D, 100PE ve 100AE yakıtlarının oksijen (O_2) değişimleri	98
Şekil 5. 38. Değişik devirlerde, tam gaz ve 225 bar enjeksiyon basıncında 100D, 50PE50D, 50AE50D, 100PE ve 100AE yakıtlarının oksijen (O_2) değişimleri	99
Şekil 5. 39. Değişik devirlerde, tam gaz ve 250 bar enjeksiyon basıncında 100D, 50PE50D, 50AE50D, 100PE ve 100AE yakıtlarının oksijen (O_2) değişimleri	99
Şekil 5. 40. Sabit devir, tam gaz ve değişik enjeksiyon basınçlarında 100D, 50PE50D, 50AE50D, 100PE ve 100AE yakıtlarının oksijen (O_2) değişimleri	100
Şekil 5. 41. Değişik devirlerde, tam gaz ve 150 bar enjeksiyon basıncında 100D, 50PE50D, 50AE50D, 100PE ve 100AE yakıtlarının hava fazlalık katsayılarının değişimleri	102
Şekil 5. 42. Değişik devirlerde, tam gaz ve 175 bar enjeksiyon basıncında 100D, 50PE50D, 50AE50D, 100PE ve 100AE yakıtlarının hava fazlalık katsayılarının değişimleri	102
Şekil 5. 43. Değişik devirlerde, tam gaz ve 200 bar enjeksiyon basıncında 100D, 50PE50D, 50AE50D, 100PE ve 100AE yakıtlarının hava fazlalık	

katsayılarının değişimleri	103
Şekil 5. 44. Değişik devirlerde, tam gaz ve 225 bar enjeksiyon basıncında 100D, 50PE50D, 50AE50D, 100PE ve 100AE yakıtlarının hava fazlalık katsayılarının değişimleri	103
Şekil 5. 45. Değişik devirlerde, tam gaz ve 250 bar enjeksiyon basıncında 100D, 50PE50D, 50AE50D, 100PE ve 100AE yakıtlarının hava fazlalık katsayılarının değişimleri	104
Şekil 5. 46. Sabit devir, tam gaz ve değişik enjeksiyon basınçlarında 100D, 50PE50D, 50AE50D, 100PE ve 100AE yakıtlarının hava fazlalık katsayısı değişimleri	105
Şekil 5. 47. Motorun 150 bar enjeksiyon basıncı ve 3100 d/dak'daki is oluşumu	106
Şekil 5. 48. Motorun 175 bar enjeksiyon basıncı ve 3100 d/dak'daki is oluşumu	106
Şekil 5. 49. Motorun 200 bar enjeksiyon basıncı ve 3100 d/dak'daki is oluşumu	107
Şekil 5. 50. Motorun 225 bar enjeksiyon basıncı ve 3100 d/dak'daki is oluşumu	107
Şekil 5. 51. Motorun 250 bar enjeksiyon basıncı ve 3100 d/dak'daki is oluşumu	107
Şekil 5. 52. Sabit devir, tam gaz ve değişik enjeksiyon basınçlarında 100D, 50PE50D, 50AE50D, 100PE ve 100AE yakıtlarının egzoz gazı sıcaklığı değişimleri	108

SİMGELER LİSTESİ

A	Rafine edilmiş ayçiçek yağı
AE	Ayçiçek yağı metil esteri
PE	Pamuk yağı metil esteri
AFR	Hava /yakıt oranı
A_1, A_2	Sabit katsayılar
B	Silindir boyutu (m)
Be	Yakıtın akış debisi (kg/h)
b_e	Özgül yakıt tüketimi (g/kwh)
Cp	Özgül ısı (kj/kg °K)
D	Dizel yakıtı
d	Nozul çapı (mm)
E	Aktivasyon enerjisi (J/mol)
E_0	Partikül oluşumu sırasında aktivasyon enerjisi (J/mol)
Eox	Partikülün oksidasyonu sırasında aktivasyon enerjisi (J/mol)
Ep	Oluşan partikülün aktivasyon enerjisi (J/mol)
Hu	Yakıtın alt ısı değeri (kj/kg)
h	Manometrede okunan fark basınç (mmSS)
H	ısı transfer katsayısı ($w/m^2 \text{ } ^\circ K$)
LPG	Sıvılaştırılmış petrol gazı
Md	Motor momenti (Nm)
m	Boyutsuz sayı
m_b	Buharlaşmış yakıtın kütlesi (kg)
$m_{\text{ç}}$	Çıkan gazın kütlesi (kg)
m_g	Giren gazın kütlesi (kg)
m_{ox}	Oksitlenen partikülün kütlesi (kg)
m_{yb}	Yakıt buharının kütlesi (kg)
m_o	Oksijenin kütlesi (kg)
m_v	Silindir içinde yanmaya hazır yakıt miktarı (kg)
SN	Setan sayısı
τ	Yanma gecikmesi zamanı (sn)

ÜÖN	Üst ölü nokta
AÖN	Alt ölü nokta
HFK	Hava fazlalık katsayısı
k	Denklem denge sabiti
m	Akışkan kütlesi (kg)
P	Silindir basıncı (kPa)
Pe	Motorda elde edilen güç (kw)
Pm	Partikül madde
P _o	Partikül oluşum oranı
P _{ox}	Partikül oksitlenme oranı
R	Gaz sabiti (J/mol°C)
T	Gaz sıcaklığı (°K)
T _w	Silindir cidar sıcaklığı (°K)
λ	hava fazlalık katsayısı (gerçek hava yakıt oranı / teorik hava yakıt oranı)
t	Aktivasyon süresi (sn)
$\bar{x}$	Mol fraksiyonu
$\bar{x}_{HC}$	Hidrokarbonların mol fraksiyonu
X _{ox}	Oksijenin mol oranı
V _k	Karışım hacmi (m ³)
W	Piston hızına göre değişen silindir gazının hızı (m/s)
Q	Havanın hacimsel debisi (m ³ /h)
ρ	Havanın yoğunluğu (kg/m ³)
Z _R	Reynold sayısı düzeltme faktörü
Z _P	Boru boyut düzeltme faktörü
ε	Genişleme faktörü
100D	Hacimsel olarak %100 dizel yakıtı
50PE50D	Hacimsel olarak %50 pamuk yağı metil esteri,%50 dizel yakıtı
50AE50D	Hacimsel olarak %50 ayçiçek yağı metil esteri, %50 dizel yakıtı
100AE	Hacimsel olarak %100 ayçiçek yağı metil esteri
100PE	Hacimsel olarak %100 pamuk yağı metil esteri

1. GİRİŞ

1.1. Petrol ve Önemi

20. yüzyıldan itibaren petrol içten yanmalı motorlarda kullanılmaya başlanmıştır. Petrolün bundan beş bin yıl önce kullanıldığına dair bazı belgeler de bulunmuştur. Dünyada ilk petrolü Amerika'nın Pensilvanya Eyaletinde bir ABD'li mühendis 1859 yılında bulmuştur. İlk petrol üretimi ve rafine şirketi yine Amerikalılar tarafında 1865 yılında Cleauland Ohio'da kurulmuştur. Ortadoğu'da ilk petrol kuyusu İran'ın Mescit Süleyman kentinde İngiliz kökenli Ancila Petrol tarafından 1908 yılında işletmeye açılmıştır. Arap Yarımadası'nda petrol üretim ve rafine şirketlerini tesis eden ilk petrol şirketi İngilizlerin British Petrol (BP) şirketi oldu. Suudi Arabistan'da ilk petrol şirketi "Shevron" sözleşmesi ile Suudi petrolünün tüm haklarını 1933'ten sonra 60 yıl boyunca elde etti. 1960 yılında kurulan OPEC'e 13 devlet üye oldu ve dünyanın en büyük petrol rezervlerini elinde bulundurmasına rağmen ikinci büyük petrol satıcısı durumunda idi.

Amerika birleşik Devletleri'nde yapılan araştırma belgelerinde yer alan dünya enerji dairesi raporlarına göre petrolün tahmini dünya rezervi 2.330 milyar varildir. Bu rakamın yaklaşık üçte biri tüketilmiş durumdadır. Dünya üretimi bu şekilde devam edecek olursa yıllık 22 milyar varillik üretim ile yaklaşık 70 yıl sonra dünya petrolü bitme noktasına gelecektir [Chekel, 1993]. Rezerv büyüklüğü yanında dünya petrol yatakları homojen değildir. Bu petrolün %79'u doğuda bulunur ve bunun da %58'i OPEC ülkelerince kontrol edilmektedir. Buna karşılık dünyanın en çok enerji tüketen ülkeleri ise batıda bulunmaktadır. Kanada, İngiltere, Norveç ve Amerika birleşik Devletleri bu ülkelerin başında yer almaktadır. Kısa bir süre içerisinde petrol rezervlerinin biteceği tahmin edilmektedir.

Petrol keşfedildikten sonra devamlı olarak bir siyasi araç olarak kullanılmakta ve petrol üzerine yapılan hesaplar sonucu savaşlar çıkmaktadır. Bu yüzden 20. Yüzyılda bir çok petrol krizleri meydana gelmiştir. Dünya savaşları hariç tutulduğunda, ilk petrol krizi 1948 yılında İsrail – Filistin savaşında ortaya çıkmıştır. Arap ülkeleri İsrail'i destekleyen İngiltere ve ABD'yi protesto etmek amacıyla petrol satışını askıya aldılar. İkinci kriz, 1973 yılında İsrail – Arap ülkeleri arasındaki savaş sebebiyle Arap ülkeleri dünyaya petrol satışlarını ikinci defa askıya alınca gerçekleşti. 1979 yılında İran petrol

ihracını durdurarak İngiliz ve ABD şirketlerinde krize yol açmıştır. 1980 yılında İran - Irak savaşında OPEC üyesi diğer ülkeler standartların üzerinde satış yaparak krize sebep oldular. 1990 yılında Irak'ın Kuveyt'i işgali ve ABD'nin ambargo baskısı yine petrol fiyatlarının yükselmesine sebep olmuştur. Ülkemiz de bu krizden en çok etkilenen ülkelerin başında gelmektedir.

Türkiye'nin enerji ihtiyacı ekonomik büyümeyi engelleyecek bir durumdadır. Ülkemizin petrol üretimi tüketimi karşısında çok sınırlı kalmaktadır. Petrol ihtiyacımızın %87'si dış alımla karşılanmaktadır. Enerji konusunda ülkemiz dışa bağımlı olmaya devam ettiği sürece yeni enerji kaynaklarının araştırılması da büyük önem taşımaktadır. Bu enerji kaynakları yenilenebilir enerji kaynakları olarak bilinmektedir. Otomotiv alanında petrol yerine kullanılabilecek enerji, güneş enerjisi, sıvılaştırılmış petrol gazları (LPG) ve bitkisel yağlardır. Ülkemiz bir tarım ülkesi olduğu için bitkisel yağlar yenilenebilir enerji kaynaklarının başında gelmektedir. Bitkisel yağların motor üzerinde hiçbir değişiklik yapılmadan kullanılabilme imkanı mevcuttur. Bitkisel yağların alternatif motor yakıtı olarak kullanılmasını zorlaştıran fiziksel özelliği vizkozitesidir. Tarım potansiyeli yüksek olan ülkemizde en çok üretilen yağ bitkileri ayçiçek, pamuk, mısır, zeytin, susam, haşhaş ve soya olarak bilinmektedir. Bitkisel yağlar hala ülkemizde yemeklik yağ olarak tüketildiği için ekim ve üretim miktarları da bu alana cevap verebilecek seviyededir. Bitkisel yağların motor yakıtı olarak kullanılması halinde petrol bakımından dışa bağımlı olan ülkemizin tarım alanları işler bir duruma gelmesi beklenmektedir. Ayçiçek yağının ülkemizdeki üretim miktarı 1992 yılı itibarıyla 452.220 ton ve pamuk yağının üretim miktarı 12.640 ton olarak bilinmektedir [Çetinkaya, 1995]. Başka bir kaynağa göre ülkemizde 570.000 hektar ekili alanda 11.500.000 ton ayçiçeği ve 585.800 hektar ekili alanda da 858.858 ton pamuk tohumu üretilmektedir. Ayçiçeğinin yağ oranı %40 – 50 ve pamuk tohumunun yağ oranı %16 olarak bilinmektedir [Demirsoy, vd. 1997]. Bu ekim ve üretim miktarları Güneydoğu Anadolu Projesi (GAP) ile beraber büyük miktarda artması beklenmektedir.

Yirminci Yüzyılın başlarında petrol ürünleri motor yakıtı olarak kullanılmaya başlanmış ve motor tasarımları da petrol ürünleri ile çalışabilecek şekilde geliştirilmiştir. Yukarıda bahsedilen krizler dışında, petrol ürünleri kolay elde edilebildiği için motor sanayii petrole bağımlı hale gelmiştir. Değişik zamanlarda özellikle 1973 yılında yaşanan petrol krizi sonucu petrol fiyatları aşırı derecede artmış

olup bunun neticesinde ekonomik krizler ortaya çıkmıştır. Ülkemizde ise bu ekonomik kriz daha büyük boyutlara ulaşmıştır. Petrol rezervlerinin belirli bölgelerde toplanması ve bu rezervlerin belli bir sona dayanması, mevcut motor teknolojisinde önemli değişiklikler yapmadan ve ekonomik krizlere de sebep olan petrole alternatif olabilecek yeni motor yakıtlarının araştırılması zorunlu hale gelmiştir. Kalkınmış ve kalkınmakta olan ülkelerde yeni ve yenilenebilir enerji kaynakları üzerinde büyük çalışmalar yapılmaktadır. Bu çalışmalar petrole dayanmayan yakıtların motorlarda kullanılması araştırmaları şeklinde devam etmektedir. Doğalgaz, biyogaz, hidrojen, güneş enerjisi, alkoller ve bitkisel yağlar gibi petrole alternatif olabilecek yakıtların araştırılması devam etmektedir. Ayrıca yakıt pilleri veya hücreleri üzerinde de çalışmalar yapılmaktadır [Cantoni, vd. 1993].

Bitkisel yağlar üzerindeki çalışmalar daha çok dizel motorlarında görülmektedir. Bu konuda çeşitli ülkelerde çok sayıda araştırma çalışmaları yapılmıştır. Bu çalışmaların sonucunda sözkonusu yağların içten yanmalı motorlarda kullanılabilme özelliklerine sahip oldukları bulunmuştur. Bu çalışmalar sonucunda petrole alternatif olabilecek bir çok yeni yakıt türleri ortaya çıkmıştır. Memleketimizin kısıtlı petrol üretimine karşı tüketimi de oldukça fazladır. Petrol ihtiyacının %80'e yakın bir kısmını dış ülkelere karşılayan Türkiye'de petrol ithalatı için her yıl önemli kaynak ayrılmaktadır. Rafine yemeklik yağın dışında kalan bitkisel yağların çeşitli işlemlere tabi tutularak dizel motorlarında kullanılabilme imkanları mevcuttur. Buna karşılık tarımsal yağ ürünü potansiyeli yönünde ülkemiz çok iyi durumdadır. Ülkemizin bitkisel yağ üretim potansiyeli yemeklik yağ ihtiyacının çok üzerindeki talepleri karşılayabilecek seviyededir. Bu yağlar motor yakıtı olarak kullanıldığı vakit mevcut üretim alanları daha da artırılabilir durumdadır.

Avustralya'nın Victoria Eyaletinde yapılan bir araştırmada hava kirliliğinin yaklaşık %90'nına yakını motorlu taşıtlarda ve geriye kalanı da endüstri kuruluşları ile diğer kaynaklardan oluştuğu kaydedilmiştir [Watson, vd. 1993]. Motorlu taşıtlardan kaynaklanan hava kirliliğinin azaltılması ile ilgili çalışmalar, ülkelere göre farklılıklar göstermektedir. Hava kirliliğine sebep olan motorlu taşıtların egzoz emisyonlarını azaltmak için çok yönlü çalışmalar yapılmaktadır. Yakıtın, buharlaştırılarak alevin üzerine püskürtülmesi durumunda azot bağının zayıflaması sonucu NO_x oranı önemli ölçüde düştüğü görülmüştür [Cernej, vd. 1993]. Bata ve arkadaşları [1992], şehir taşıma

araçları üzerinde yaptıkları araştırmada, motor üzerinde herhangi bir değişiklik yapmadan bir dizel motorunun yanma odasında dizel yakıtı ile sıkıştırılmış doğal gazı (CNG) karıştırarak yakmışlardır. Bunun sonucunda en düşük CO, HC ve partikül madde seviyelerini elde etmişlerdir ve buna karşılık en yüksek NO_x miktarı oluşmuştur. Sıkıştırılmış doğal gaz ile sıvılaştırılmış doğal gaz (LNG) oranları %90'a çıkınca bu yakıt temiz dizel yakıtı olarak adlandırılmıştır. Bu karışım oranı ile metan gazı yükselmesi başlar ve bu da hidrokarbonların yükselmesi demektir. Türbülanslı yanma odasında sıkıştırılmış doğal gaz yakıldığı vakit, kirlenici emisyonlar Avrupa Standartlarının altına düşürmeyi başarmışlardır [Gambino, vd. 1993]. Nagano ve arkadaşları [1991], deney motorunun yanma odasına hava jeti sağlayan bir jeneratör yardımı ile yanma esnasında yanma odasının merkezine doğru bir hava jeti vererek kurum miktarında önemli düşüşler sağlamışlardır. Bu çalışmada NO_x ve CO oranlarında da önemli düşüşler görülmüştür.

Emisyonların düşürülmesi için mevcut dizel yakıtların kalitesinin iyileştirilmesi çalışmaları yanında petrole alternatif olan bir çok yakıtlar üzerinde çalışmalar yapılmaktadır. Bunlar petrol ürünü yakıtlar ile karşılaştırıldığı vakit fiyat bakımından kazançlı olup olmadığı henüz tespit edilmemiştir. Emisyon miktarının düşürülmesi için kullanılan bu yakıtlar metanol, etanol, sıvılaştırılmış petrol gazı (LPG), bitkisel yağlar ile esterleri ve elektrik enerjisidir. Çevrenin korunması için taşıt üretici firmalar ve çevre ile ilgili kuruluşlar 2000 yılından sonra taşıtlardan oluşan hava kirliliğini sıfıra kadar düşürmeyi amaçlamaktadırlar [Dunne, vd. 1993].

Bazı ülkeler mevcut yakıtın kalitesini iyileştirmeye çalışırken bazıları da değişik alternatif yakıtlar üzerinde çalışmalar yapmaktadırlar. Bu çalışmalar elektrik enerjisi, güneş enerjisi, sıvılaştırılmış petrol gazları (LPG) ve doğal gaz ile bitkisel yağlar üzerinde yoğunlaşmaktadır. Bitkisel yağlar sıkıştırma ile ateşlemeli sistemlere daha uygun olduğu için bu alternatif yakıtlar genellikle dizel motorlarında denenmektedir. Bu motorların egzoz emisyonlarında partikül kirlenicilerin önemli bir yer tutması diğer motorlara oranla alternatif yakıt kullanma çalışmalarının daha gerekli olduğu ortaya çıkmaktadır.

Bu konu ile ilgili olarak emisyonların azaltılması için değişik ülkelerde çok çeşitli çalışmalar halen sürdürüldüğü belirtilmektedir [Cowby, vd. 1993]. Ateşleme avansı düzenleyicileri, setan sayısını düzenleyen bileşenler üzerindeki çalışmalar ve

dizel yakıtına bazı katkıları yapılarak CO ve partikül madde oranı %45 oranına kadar düşürülmüştür [Andrews, vd. 1993]. Yanmayı iyileştirme ve egzoz emisyonlarını düşürme ile ilgili yapılan teorik çalışmaların bazıları olumlu sonuçlar vermiştir. Bazıları da laboratuvar şartlarında veya özel amaçlı belirli çalışma bölgelerinde incelenmiş ve kullanılmıştır. Yanma odasındaki yanma işlemi ve sonrası incelenerek püskürtülen yakıtın damlacık boyutları ile dağılımı, silindir içindeki sıcaklık ile basıncın etkileri incelenmiştir. Bu incelemeler sonucu bir çok formül elde edilmiştir. Araştırmacılar bu bağıntılardan elde edilen sonuçları, deneysel sonuçlarla karşılaştırdıklarında kullanılan modellerin egzoz emisyonlarının kontrolü çalışmalarında kullanma uygunluğu gösterdikleri sonucuna varmışlardır [Allen, vd. 1993].

Yapılan teorik çalışmalarda püskürtme zamanı, püskürtme miktarı, yakıt dağılımı, hava hareketi ile motor hızının emisyon oluşum miktarı üzerindeki etkiler Zeng ve arkadaşları [1993] tarafından incelenmiştir. Bu inceleme ile bulunan motorun performansı ile ilgili sonuçlar değerlendirildikten sonra NO, HC, CO ve partikül modellerinin uygun oldukları sonucuna varılmıştır. Azot oksitlerin oluşumunda Zeldovich mekanizması kullanılırken, diğer gaz emisyonlarının tespit edilmesinde ise kimyasal denklik yöntemlerinin iyi sonuç verdikleri kanaatine varılmıştır.

Dizel motorlarında gaz ve partikül emisyonlarının teorik olarak modellenmesi ve bilgisayar simülasyon programlarının geliştirilmesi çalışmaları bu emisyonların azaltılması için devam etmektedir. Bu çalışmada ise bu emisyonların düşürülmesi için dizel yakıtına alternatif olarak ayçiçek ve pamuk yağı metil esteri kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar eğriler halinde karşılaştırılarak uygunluğu ortaya çıkarılmıştır.

1. 2. Dizel Motorlarında Alternatif Yakıt Olarak Bitkisel Yağ Kullanımı

Bitkisel yağlarla ilgili çalışmaların çoğu dizel motorları üzerinde hiç bir değişiklik yapılmadan gerçekleştirilmiştir. Bitkisel yağlarla dizel yakıtı arasında özgül ağırlık ile alt ısı değeri bakımından fazla bir fark bulunmamasına rağmen kinematik vizkoziteleri oldukça farklıdır. Yağların vizkoziteleri dizel yakıtından yaklaşık 10-20 kat daha fazladır. Cazip görünen yönü, bitkisel yağ yakıtların çoğu motorlarda minimum değişiklik ile kullanılabilen yakıtlar olmasıdır. Bu yakıtların, en az dizel

yakıtı kadar güvenilir olduğu ve ileride dizel yakıtının yerini alacağı tahmin edilmektedir [Pryde, vd. 1983].

Bitkisel yağlar ya tek başına ya da dizel yakıtı karışımı olarak dizel motorlarında kullanıldığına dair yapılan birçok çalışma rapor halinde literatüre geçmiştir. Bitkisel yağların karakteristiklerine ait bir tanım geliştirilmemesine rağmen bu yağlarla çalışan motorun aşınması ve bakımı gibi faktörlerde alternatif yakıtların uzun süre kullanım etkileri de literatürde tartışılmıştır. Bir motorda farklı bitkisel yağlar kullanılarak performans karakterlerindeki değişiklikler bilimsel makalelerde gösterilmiştir [Engler, vd. 1983]. Bu farklar değişik yağların kimyasal veya fiziksel özellikleri olan viskozite, yağ asidi durumu, doymuşluk derecesi, molekül ağırlığı ve ikinci derece bileşenlerine bağlıdır. Bununla beraber sadece motor performansında gösterdiği değişiklikler test yakıtı karakterleri ile açıklanamaz, aynı zamanda motorun yapısı ve çalışma şartları da önemlidir [Korus, vd. 1985].

Bitkisel yağlarla ilgili yapılan bir çok araştırmada, yanma odasında özellikle enjektör memesinde karbon birikimi olduğu gözlenmiştir. Yakıt atomizasyonunun azalması sonucu, yanma veriminin düşmesi, yağlama yağının katılaşması, piston segman yapışması gibi problemlerin de ortaya çıktığı ve bu durumlara karşı yeni tedbirlerin alınması zorunlu hale gelmiştir. Bunun için de farklı deneylerin yapılması tavsiye edilmiştir [Ziejewski, vd. 1983].

Klopfenstein ve arkadaşları [1983] yağ asitleri olan laurik, myristik, stearik, linoleik ve linolenik asitlerinin metil esteri, oleik asidin etil ve butil esterlerini dizel motoru yakıtı olarak etkilerini ölçmek amacıyla dizel motorlarında yakmışlardır. Motor momenti ve güç düşüşü gibi olumsuz ve kirlletici emisyonların düşüşü gibi olumlu sonuçlar bulmuşlardır. Walker ve arkadaşları [1983] bitkisel yağları kısa süreli yüklerde ve oranlanmış hızlarda çalışan tek silindirli direkt enjeksiyonlu bir motorda deneyerek motor performansındaki etkilerini araştırmışlardır. Özgül yakıt tüketiminin ve termal etkilerin bu yakıtlar ile sınırlandığını görmüşlerdir. Doymuş yağ asitlerinin metil esterlerinde termal etkinin yağ asidinin zincir uzunluğuna bağlı olarak değiştiğini araştırmışlardır. Çift bağın başlaması ile bu etki yükselmiştir. Etil oleatın en yüksek termal etkiye ve butil oleatın da herhangi bir ester termal etkisine sahip olduğu bulunmuştur. Bitkisel yağ esterlerinin çoğu dizel yakıtından daha yüksek termal etkiler göstermiştir. Doymamış yağların metil ve etil esterleri veya kısa zincirli yağ asitleri iyi

bir alternatif dizel yakıtı olarak kullanılabilir ve uzun süre motor deneylerinde değerlendirilebilir olduğu ortaya çıkmıştır [Klopfenstein, 1983].

Yapılan araştırma sonucu bitkisel yağların, değişik monohidrit alkoller ile esterleştirilmesi veya trigliserid oluşturulması ile dizel yakıtı olarak veya dizel yakıtı yerine kullanılmasının uygun olduğu görülmüştür [Moriarty, 1994]. Bitkisel yağların çoğu değişik öneme sahip olabilen özel asitlerinin oranlarına göre genel bir yağ asidi grubu ihtiva ederler. Bazı bitkisel yağlar da karakteristik olarak genel yağ asitlerinin bileşimini yüksek bir oranda içerirler. Dizel yakıtı olarak genel yağ asitlerinin herhangi birini ester ile sınırlandırmak mümkündür. Değişik yağların gösterdiği performans, özellikle bazı bitkisel yağlar için önemli değişiklikler göstermektedir [Haq, 1995].

Yapılan bir çok araştırmada dizel yakıtı yerine bir çok bitkisel yağ kullanılmıştır. Bu yağların kullanımı 1920'lere kadar dayanmaktadır. Bu bitkisel yağlar soya fasulyesi, ayçiçeği, pamuk çekirdeği, zeytin, yer fıstığı, kolza tohumu ve palmye yağları ile onların karışımlarıdır. Bunların bir kısmı esterlerine dönüştürülmek suretiyle kullanılmıştır. Yenilenebilir enerji kaynakları olarak kullanılabilen bu bitkisel yağların çoğu dizel motorları için ümit verici bir alternatif yakıt olarak görülmektedir [Masjuki, 1993].

Malezya Araştırma Enstitüsü 1983'te palmye yağını hem ham yağ ve hem de stearinini başarı ile metil esterlerine dönüştürmüştür. Daha sonra bu esterlerin özellikleri dizel yakıtının özellikleri ile karşılaştırılarak karakterize edilmiştir. Sülfür içeriği çok düşük olduğu için kirletici emisyon oranları daha düşüktür. Elde edilen bu yakıt hacimsel olarak %25, %50 ve %75 oranında dizel motorlarında kullanılmış ve önemli performans değerleri elde edilmiştir. Gelecekte bu alandaki bu araştırma çevre ve enerji problemi çözümünde dizel motorlarında bir alternatif yakıt olarak palmye yağı kullanımının daha ekonomik olacağı belirtilmiştir [Masjuki, 1993].

Bitkisel yağlar motor aksamı üzerinde hiç bir değişiklik yapılmaksızın dizel yakıtları ile karşılaştırılabilir derecede önemli performanslar gösterebilmektedir. Bununla beraber uzun kullanımdan sonra, sert karbon birikintileri, enjektör memesi tıkanmaları ve segman yapışması meydana gelmektedir. Son zamanlarda kolza yağının metil, etil veya bütil esterleri uzun vadede kullanıldığı takdirde bu etkilerin azalacağı yapılan deneylerle ispatlanmıştır. Böylece şehirleşme alanında kirletici emisyonlarının zorunlu olarak düşürülmesi gerektiği için bu yağların esterlerinin kullanılması uygun

olmaktadır. Bu yakıtların formüllerinde oksijen varlığı ve üretimindeki sülfür yokluğundan dolayı ester kullanımı çok ümit verici olduğu belirtilmektedir [Police, 1993].

Kullanılan bitkisel yağ türlerinde pamuk yağı için performans değerleri olumlu bulunmuş olup bu sonuçlar çeşitli yerlerde yayınlanmıştır. Bununla beraber pamuk yağı için çeşitli olumsuzluklar da ortaya çıkmaktadır. Bunlar; enjeksiyon memesi üzerinde aşırı derecede karbon birikimi, motor parçalarının korozyonu ve ilk çalışmanın tam yeterli olmayışı olarak belirtilmektedir [Engler, 1983].

Pamuk yağının %100 oranında kullanılması halinde ateşleme noksanlığının olmasına rağmen %10 dizel yakıtı %90 pamuk yağı daha iyi bir performans göstermiştir. Kullanılan yağın üretim şartları ile deney motorunun tasarımı, motor performansı ile emisyonunda önemli etkilerde bulunabileceği üzerinde araştırmalar yapılmıştır [Engler, 1983].

Direkt enjeksiyonlu bir dizel motorunda hacimsel olarak %25 oranında rafine edilmiş ayçiçek yağı, %75 dizel yakıtı karıştırılarak yapılan motor çalıştırma deneylerinde önemli problemler olmadığı belirtilmektedir. Karışımda yağ oranı yükselirken enjeksiyon meme uçlarında kurum birikimi, egzoz sisteminde birikinti, enjektör iğnesinin yapışması, kompresyon segman kanallarının karbon dolgusu ve pistonlarda reçine birikimi gibi problemler ortaya çıkmıştır. Bunun için %25 ayçiçek yağı, %75 dizel yakıtının motorlarda kullanımı uzun süre için tavsiye edilmemiştir [Ziejewski, vd. 1983].

Bitkisel yağlardan zeytin yağının motor yakıtı olarak kullanılması halinde bazı problemler ortaya çıkmaktadır. Yüksek viskoziteden dolayı iyi bir püskürtme olmayışı ile motorun enjektör memeleri ile silindirlerde karbon birikimleri görülmüştür. Buna karşılık bu yağın monoesterinin dizel motoru yakıtı olarak kullanılması önerilmiştir. Buna benzer çalışmalarda soya fasulyesi, kolza ve palmiye yağının mono esterleri kullanılmıştır [Aksoy, vd. 1988].

Kolza yağının metil esteri, dizel motoru üzerinde hiç bir değişiklik yapılmaksızın rahatlıkla kullanılmıştır. Bu yağın metil esterinin fiziksel ve kimyasal özellikleri yani ısı değeri, yoğunluğu, vizkozite ve setan sayısı gibi değerleri dizel yakıtına çok yakındır. Bu yakıt traktörde kullanıldığı vakit dizel yakıtına oranla %5'e kadar bir güç kaybı görülmüştür. Buna karşılık azot oksit emisyonlarının seviyeleri

diğer yakıtlardan daha düşük olduğu görülmüştür. Fosil yakıtlar yerine kolza yağının metil esterini kullanıldığında karbonmonoksit emisyonunda da düşüş gözlenmiştir [Culshaw, vd. 1983]. ASTM tarafından geliştirilen kolza yağının dizel yakıtı ile karşılaştırılması için 6 silindirli John Deere turboşarjlı motor kullanılmış olup, maksimum gücün aynı, özgül yakıt tüketiminin yağda %6 daha fazla olduğu, bunun da yağın ısı değeri dizel yakıtından %14 daha az olduğundan kaynaklandığı, çalışma başlangıcında problem olmadığı, partikül maddenin yağda daha az olduğu ve yağın az gürültü ile yandığı Strayer ve arkadaşları [1983] tarafından belirtilmektedir. Aynı zamanda bu yağın daha akıcı veya viskozitesini düşürmek için, ısıtılarak kullanılması da tavsiye edilmiştir.

Crookes ve arkadaşları [1993], çeşitli basamaklarda değişen yük şartlarında 2500 ile 3500 d/d'da dizel yakıtı, bitkisel yağ ve bunların %10 su hacimli emülsiyonunu kullanmışlardır. Burada özgül yakıt tüketimi, termik verim, ateşleme gecikmesi, azot ve oksitleri, karbonmonoksit ve karbon dioksit ile kurum ölçülmüştür. En yüksek termik verimler bitkisel yağlar ile onların emülsiyonlarında elde edildiğini görmüşlerdir. Maksimum yükte ve 2500 ile 3500 d/d'da en düşük azot oksitleri ile en düşük partikül madde ölçülmüştür.

Clark ve arkadaşları [1984], soya yağının metil ve etil esterlerini, viskozitelerini düşürmek için alkollerle karıştırarak dizel motorlarda kullanmış ve dizel yakıtı ile karşılaştırarak motor performans değerlerini ölçmüşlerdir. Soya yağ esterini kullanımında dizel yakıtına göre motor performansında çok az bir düşüş gözlenmiştir. Bu da soya yağ esterinin ısı değeri dizel yakıtın ısı değerinden düşük oluşundan kaynaklandığı belirtilmektedir. İki yakıt için azot oksitleri dışında diğer emisyonlar aynı olmuş ve esterler için azot oksitleri daha yüksek seviyede olduğu belirlenmiştir. Motorun aşınması ve yakıt enjeksiyon sistemleri normal görünümde olduğu belirtilmiştir [Adams, vd. 1983].

Nye ve arkadaşları [1983], dizel motoru yakıtı olarak kullandıkları bitkisel yağı ısıtarak alkol ilavesi ile asidik ve bazik şartlar altında reaksiyona sokarak bazı yeni özellikler kazandırmışlardır. İlave alkol olarak metanol, etanol, propanol ve butanol kullanılmıştır. Yağ yakıtların bu işlemten sonra viskoziteleri düştüğü için olumlu sonuçlar alınmıştır. En iyi sonuçlar potasyum hidroksit ve metanolun kullanımı ile elde

edilmiştir. Laboratuvar şartlarında yüksek hızlı dizel motorlarında kullanılan bitkisel yağın metil, etil ve butil esterleri ile çok iyi sonuçlar elde edilmiştir.

Pryde ve arkadaşları [1983], bitkisel yağların ester yakıtlarını kullanarak bunların dizel yakıtına alternatif olabilecek kadar ümit verici olduklarını göstermişlerdir. Bu çalışmanın sonucunda dizel motoru yakıtı olarak en iyi şekilde uygulanabilir bitkisel yağ yakıtları hazırlanabilir ve esterler geliştirilebilir düşüncesi ile ileriki çalışmaların ester ve emülsiyonlar üzerinde yoğunlaşmalarını tavsiye etmişlerdir. Benzer şekilde Winsor [1993] tarafından yapılan çalışmada kolza ve soya yağının esterleri kullanılmış, bu yakıtların kullanılmasında dizel yakıtına göre HC, CO, NO_x ve partikül madde emisyonlarında önemli derecede düşüşler kaydedilmiştir.

Kolza yağının metil esteri ve onun bileşenleri bir alternatif dizel yakıtı olarak iki ve altı silindirli dizel motorlarda kullanılmıştır. Dizel yakıtına çok yakın güç değerleri elde edilmiştir. Özgül yakıt tüketimi dizel yakıtından %6 daha fazla olmuştur. Kolza yağının metil esterinin ısı değeri dizel yakıtının ısı değerinden %14 daha düşük olduğu ölçülmüştür. İlk çalışma zorluğu görülmemiş ve partikül madde emisyonlarında düşüş olduğu gözlenmiştir [Strayer, vd. 1983].

Kolza yağının dizel motorlarında kullanılması ile ilgili çalışmalar Peterson ve arkadaşları [1983] tarafından da yapılmış, kolza yağı bir dizel motorunda toplam 230 saat kullanılmış ve vizkozitenin yüksekliğinden dolayı silindir içinde atomizasyon zorluğu ile karşılaşmıştır. Yağın ön ısıtmaya tabii tutulması halinde püskürtmenin biraz daha düzeldiği gözlenmiştir. Motor performansına etkisi ve yakıt tüketimi dizel yakıtına eşdeğer bir durum göstermiştir. Değişen motor devir sayıları ile maksimum güç deneylerinde çok kısa periyotlarda motor parçalarında bazı küçük hasarların olduğu gözlenmiştir. %30 kolza yağı ve %70 dizel yakıtı bileşimi ile tek silindirli bir motor başarılı bir şekilde 850 saat çalıştırılmıştır. Bu çalışma sonucu aşınma, yağlama yağı ve motor gücünde herhangi bir anormal durum görülmemiştir.

Malezya'da yapılan bir çalışmada palmye yağı dizel yakıtı yerine iki ay süre ile bir traktör ve bir kamyonunda kullanılmıştır. Kullanım esnasında traktörün yakıt tüketimi %5 ve kamyonun ise %8 oranında yükselme göstermiştir. Her iki taşıt için ilk hareket kolay olmuş ve motor vuruntusuz ve düzgün çalışmış, aynı zamanda çok az güç kaybı olmuştur. Emisyonlarda duman koyuluğu miktarının düştüğü gözlenmiştir. Süpür

yüzeylerinde ince bir karbon tabakasının oluştuğu ve bu tabakanın normal dizel yakıtı ile karşılaştırıldığında normal sınırlarda olduğu görülmüştür [Sapuan, vd. 1996].

Rafine edilmiş palmiye yağının metil esteri ile yapılan bir çalışmada iki araç 70.000 km. katetmiş ve dizel yakıtı ile karşılaştırıldığında, palmiye yağının metil esterinin ortalama tüketimi 12 km/litre, dizel yakıtınıninki ise 13 km/litre olarak belirlenmiştir. Her iki yakıt için de yol dinamometresi kullanılarak güçlerinin aynı olduğu tespit edilmiştir [Sapuan, vd. 1986].

Lowry [1990], dizel motorlarında bitkisel yağ kullanımı ile ilgili yaptığı çalışmada, bu yakıtın kısa süreli çalışmalar için uygun olduğunu fakat uzun süreli çalışmalar için motor performansı ile ilgili az da olsa bazı problemlerin ortaya çıktığını ileri sürmüştür. Bundan dolayı uzun sürelerde bitkisel yağlarla dizel motorlarının çalışmasını tavsiye etmemiştir ve bu yağların bazı işlemlerden geçirildikten sonra rahatlıkla kullanılabileceğini belirtmiştir.

Bitkisel yağların yüksek vizkoziteden dolayı püskürtme problemi ve düşük ateşleme kalitesine sahip oldukları için dizel motorlarında kullanımı uygun görülmemiştir. Ancak bitkisel yağların reçineden temizlenmesi, esterleştirilmesi veya motor geliştirme yoluna gidilmesi ile dizel motorlarında rahatlıkla kullanılabileceği belirtilmiştir. Yağın tam yanmama problemi turbo şarj veya oksijen zenginleştirilmesi ile ortadan kaldırılabilceği belirtilmiştir [William, vd. 1990].

Malezya'da palmiye yağını esterleştirip dizel motorlarda kullanmak için geliştirilen plan ile yılda 3000 ton palmiye yağı metil esteri elde etmesi hedeflenmiştir. Palmiye yağının dizel motorlarda kullanılabilmek özelliğinin iyileştirilmesi için esterleştirmesi gerektiği ve esterleştirme sonucu vizkozitenin dizel yakıtınıninkine yaklaştırılmış olacağı belirtilmiştir. Palmiye yağının esteri ile yapılan çalışmada karbon dioksit, karbonmonoksit ve oksijen emisyonları sınırlandırılmıştır. Yüksek hız ile CO₂'in yükselmesi gerekirken hava hareketi ile oksijenin yakıtla birleşmesinde yanma süresi kısaldığı için CO₂ miktarı düşmüş ve eksik yanma ürünü olan CO'te de çok az bir düşüş görülmüştür. Bu da yanmanın iyileştiğini göstermektedir [Sapuan, vd. 1990].

2. DİZEL MOTORLARDA KİRLETİCİ EMİSYONLARIN OLUŞUMU

İçten yanmalı motorlarda petrol ve petrol ürünleri gibi fosil yakıtlar yoğun bir şekilde kullanılmaktadır. Bunların yerine aynı ölçüde pratik, kullanışlı ve temiz enerji kaynakları bulunmadığı için motorlu araç egzozlarında çok çeşitli zararlı gaz ve partikül atmosfere karışmaktadır. Bunların etkilerinden dolayı insanlar başta olmak üzere hayvan ve bitkiler zarar görmektedir. Bundan dolayı yenilenebilir temiz enerji kaynaklarının hızla geliştirilmesi gerekir.

Benzinli ve dizel motorları büyük yerleşim birimlerinde hava kirliliğinin büyük kaynaklarını teşkil ederler. Bunların dışında baca gazları, rüzgarla uçuşan tozlar, çürümüş organik maddelerden oluşan gazlar da hava kirliliğine sebep olurlar.

Motorlu taşıtların motorlarında çıkan kirleticilerin başında karbon monoksit (CO), azot oksitler (NO_x), hidrokarbonlar (yanmamış veya kısmen yanmış) (HC) ve partikül madde gelir. Bunların miktarları motorun tasarımına, çalışma şartlarına ve yakıtın cinsine bağlı olarak değişmektedir. Genel olarak bu kirleticiler egzoz gazlarının içerisinde hacimsel olarak %40 – 49 arasında bir orana sahiptirler. Motorlu taşıtların emisyonlarının hava kirliliğindeki oranı yaklaşık %40 ile %50 arasındadır [Booth, 1993].

2. 1. Dizel Motorlarda Yanma

Dizel motorlarda yakıt, silindir içinde sıkıştırılmış havanın içerisine bir enjektör yardımı ile zerrecikler halinde püskürtülür. İçeride sıkışan havanın basıncı ve sıcaklığı yükseldiği için, püskürtülerek hava ile karışan yakıt zerrecikleri kendi kendine tutuşur ve yanma başlar. Silindir içerisinde sıkışan havanın içerisine yakıt püskürtülür püskürtülmez yanma hemen olmaz ve yakıtın hava ile karışıp oksitlenmesi için bir zaman geçer buna tutuşma gecikmesi denir. Yanma son püskürtülen yakıt zerrecikleri yanıp bitinceye kadar devam eder.

Dizel motorları kıvılcım ateşlemeli motorlardan farklılık arzederler. Dizel motorlarında sıkıştırılarak sıcaklığı yükselmiş olan hava içerisine yakıt püskürtülerek

ateşleme sağlanır, benzinli motorlarda yakıt - hava karışımı sıkıştırılır ve bir kıvılcım ile sıkıştırılmış karışım ateşlenir. Dizel motorlarında yakıtın püskürtme hızına bağlı olarak yanma oluştuğu için benzinli motorlar kadar hızlı çalışmazlar [Seebold, 1989].

Dizel motorlarında yanma üç kısımda incelenebilir.

1. Gecikme periyodu: Yanma odası içerisine yakıt enjeksiyonunun başlaması ile yanmanın başlangıcı arasındaki periyot veya püskürtme başlangıcı ile tutuşma başlangıcına kadar geçen gecikme süresidir. Bu periyodun süresi yakıt ile havanın karışımına bağlıdır. Basınç, sıcaklık, yanma odasının biçimi ve yakıtın kalitesi bu periyodu etkileyen en önemli faktörlerdir. Basınç ve sıcaklığın yüksek olması, gecikme periyodunu kısaltır. Sıkıştırılan havanın içerisine yakıt püskürtüldüğü zaman hava ile karışır. Bunun sonucunda aşırı zengin karışım bölgesinde yanma başlar fakat fakir bölgelerde yanma daha sonra başlar. Yüksek hava hareketi (türbilans) ve homojen karışım gecikme periyodu süresini azaltır. Bu aradaki sürenin uzaması içeriye daha fazla yakıtın girmesine sebep olur. İlk tutuşmanın ardından silindire dolmuş olan tüm yakıt kontrolsüz olarak (patlayarak) yanar. Tutuşma periyodu süresince silindire püskürtülen yakıt miktarının artması dizel vuruntusunun oluşmasına neden olur.

2. Ön karışmış veya hızlı yanma: Bu faz, ateşleme gecikmesi periyodu boyunca yanabilirlik sınırları içerisinde hava ile karışan yakıtın hızlı yanması ile oluşur. Bu süre zarfında silindir içerisinde basınç yükselmesi meydana gelir. Bu periyotta maksimum çevrim basıncı oluşmaktadır. Her tarafa yayılmış olan alevden dolayı yakıt kimyasal değişimlere uğrar.

3. Kontrollü yanma: Ateşleme gecikmesi boyunca karışan hava ile yakıt, birbirleri ile karışabilme oranı ile kontrol edilir. Kontrollü yanma, yanma başladıktan sonra son püskürtülen yakıtın yanmasının tamamlandığı zaman arasındaki geçen süredir. Hızlı yanmadan sonra 2000°C'nin üzerindeki bir sıcaklık ile yanan yakıt 6° krank açısına kadar devam eder ve bu sıradaki alev parlak olmayan bir karışım alevi şeklindedir. Egzoz süpabının açılmasına kadar bu periyodun tamamlanması gerekir.

Genişleme peryodu boyunca yanma düşük bir oranda devam eder. Bunun bir çok sebebi vardır. Zayıf karışım bölgelerinde yakıtın küçük bir kısmı henüz yanmamış olabilir ve bu kısımlar yanmaya devam eder. Yakıt enerjisinin bir kısmı, hidrokarbonlar şeklinde kurum olarak yanma ürünleri şeklinde gerçekleşebilir. Görüldüğü gibi dizel motorlarında yanma olayı oldukça karmaşık bir şekilde cereyan eder. Silindir içerisinde yanmanın kalitesi ve yanmanın ilerlemesi, yakıtın özelliklerine, motor yanma odası şekline ve yakıt püskürtme sistemine bağlı olarak değişir. Aynı zamanda bu özelliklerin yanma ürünlerinin oluşumu üzerinde de önemli etkileri vardır.

Dizel motorlardaki yanma işlemi ile ilgili birçok değerlendirme yapılmaktadır. Yakıtın püskürtülmesi yanma olmadan önce olduğu için benzinli motorlardaki gibi yakıt hava karışımı bir anda yanmaz ve yanma daha uzun sürer. Bunun için dizel motorlarda sıkıştırma oranı büyük tutulmak suretiyle termik verimin iyileştirilmesine çalışılır. Yakıt püskürtme işlemi, tutuşma gecikmesi süresine etki ettiği için tutuşma gecikmesi peryodunda yanma odasında biriken yakıtın yanması sonucu yüksek bir basınç oluşmaktadır. Tutuşma gecikmesi süresinin uzaması, içeriye daha fazla yakıtın girmesine sebep olmaktadır. Tutuşma başladıktan hemen sonra silindir içindeki yakıtın tamamı patlayarak yanar. Bu olay, yakıtın setan sayısının düşük olduğu durumlarda hızlanmaktadır [Shen, vd. 1993]. Silindir içerisine püskürtülen yakıt miktarı ile beraber silindir içine alınan hava miktarı da değişmektedir. Bunun için yapılan teorik hesaplar sonucu 1 kg yakıt yakmak için 14.5 kg havaya ihtiyaç vardır. Silindir içine alınan hava ile yakıt miktarı motorun momentine tesir eder. Fakir yakıt/hava karışımları sabit basınç ve sabit hacimdeki özgül ısı oranının büyük olmasına ve dolayısıyla termik verimin yükselmesine sebep olmaktadır [Heinze, 1993].

Yanma odasına püskürtülen yakıt damlacıkları ne kadar küçük olursa bu damlacıkların hava ile karışması o derece kolay olur. Bunun sonucunda ısınması ve tutuşması da kolay olmaktadır. Yakıt damlacıklarının büyüklüğü yakıtın viskozitesi, püskürtme basıncı ve enjektör memesinin delik çapına bağlı olarak değişir. Yakıt damlacıklarının yanma odası içindeki dağılımı ve ısınma hızı da sıkıştırılan havanın türbilansına bağlıdır [Heaton vd. 1993]. Hava akımını yönlendirmek için yanma odasına özel şekiller verilerek veya emme manifoldu ile emme süpabına da çeşitli biçimler verilerek türbülans meydana getirilebilir. Türbülans motorun devir sayısı ile

de artmaktadır. Motor devir sayısı da tutuşma gecikmesine etki eder. Devir sayısı yükseldikçe tutuşma gecikmesi de düşmektedir.

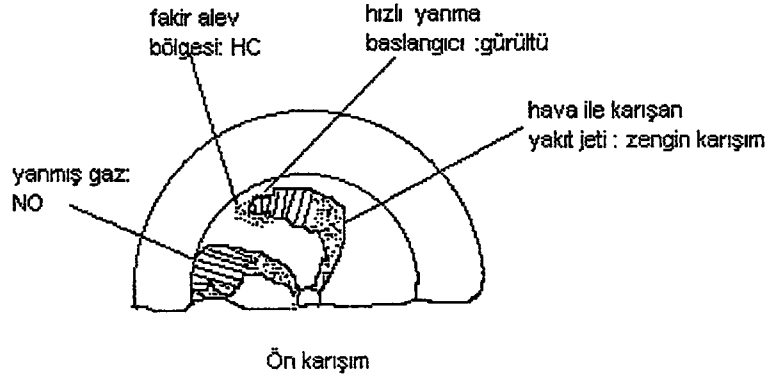
2.2. Dizel Motorlarında Kirletici Emisyonlar

Benzinli ve dizel motorları, büyük yerleşim birimlerinde hava kirliliğinin büyük kaynaklarını teşkil ederler. İçten yanmalı motorların egzoz gazları, azot oksitleri (NO_x), karbonmonoksit (CO), karbon dioksit (CO_2), kükürt oksitleri (SO_x), yanmamış veya kısmen yanmış hidrokarbon bileşikleri (HC) ve kurum veya partikül maddeyi ihtiva ederler. Bunların oluşumunu etkileyen bir çok faktörün yanında motorun tasarımı, çalışma şartları ve yakıtın cinsi çok önemlidir. Smith ve Hawley motorun tasarımı ile ilgili yaptıkları çalışmada, zengin hava yakıt oranlarındaki düşük sıkıştırma oranlarında azot oksitlerin düştüğünü ve CO ile HC 'ların yükseldiğini, yüksek sıkıştırma oranlarında ve fakir hava yakıt oranlarında bu değerlerin normal olduğunu belirlemişlerdir. Bu kirletici emisyonların oluşumu yakıt dağılımına ve bunların hava ve atık gazlarla karışımı sırasında olan değişimlere bağlıdır. Azot oksitler yüksek sıcaklıklarda oluşurlar, bu yaklaşık 1800°K 'nin üzeridir. Pistonun arkasına geçen gazlar, ayrıca motor durduktan sonra karbüratör ve yakıt tankındaki deliklerden atmosfere geçen yakıt buharları ile silindir duvarlarında alev sönme bölgelerinde kirletici hidrokarbonlar oluşur. Partikül oluşumu yanmış gazların sıcaklığı ile buharlaşmış ve yanmamış yakıttan kaynaklanmaktadır [Borat, vd. 1994].

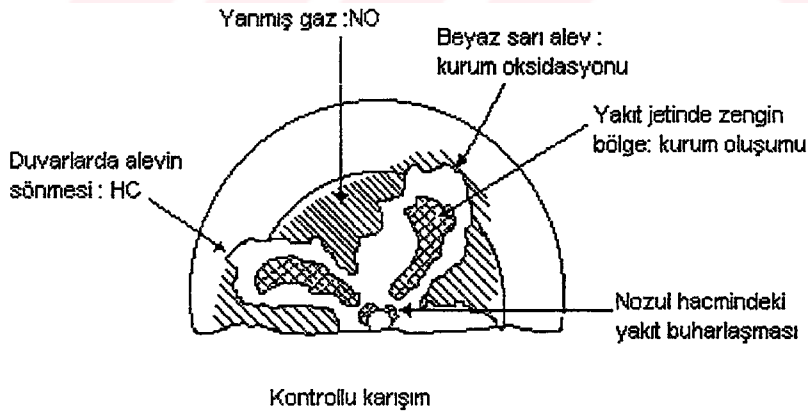
Dizel motorlarında yanma başlamadan önce silindir içerisine yakıt püskürtüldüğü için homojen bir dağılım sağlanamamaktadır. Bunun için silindir içerisinde farklı basınç, sıcaklık ve karışım bölgeleri meydana gelir. Bu da düzgün bir yanmanın olmayışına işaret etmektedir. Bundan dolayı karışık kirletici emisyon ürünleri meydana gelir. Yakıt karakteristikleri mesela bileşimi, vizkozite ve damlacık boyutu, yanma işleminin tabiatını ve dolayısıyla kirleticilerin oluşmasında önemli rol oynar [Çelik, vd. 1992].

Egzoz gazındaki kirleticilerin oluşumu püskürtme ve egzoz sırasında da oluşmaktadır. Yakıt dağılımı ve yakıtın hava ile karışımı yani ön karışım sırasında NO ve yanmamış hidrokarbonlar, kontrollü karışım sırasında HC , NO ve partikül oluşumu

Şekil 2.1. ve Şekil 2.2’de görülmektedir. Nozul etrafındaki yakıtın buharlaşması ile yanmamış hidrokarbonlar meydana gelmektedir.



Şekil 2. 1. Dizel motorlarında ön karışım sırasında kirleticilerin oluşum mekanizması [Heywood, 1988].



Şekil 2. 2. Dizel motorlarında kontrollü karışım sırasında kirleticilerin oluşum mekanizması [Heywood, 1988].

2.2.1. Kirletici gaz emisyonları

Bir dizel motorunun silindiri içerisinde motorun çalışma çevriminin farklı dört periyodu boyunca (sıkıştırma, yanma, genişleme ve egzoz durumlarında) bir çok çeşidi olan gaz kirleticiler oluşur. Kimyasal reaksiyonlar bu kirletici emisyonların oluşmasını ve seviyelerini sınırlandırmada önemli bir yer teşkil eder.

2.2.1.1. Azot oksit emisyonları

Azot oksitleri, genellikle azot oksit (NO) ile azot dioksit (NO₂) emisyonlarının beraberce adlandırılmış şeklidir. Azot oksit motor silindiri içerisinde bulunan azotun oksitlenmesi olup başlıca kaynağı atmosferik azotun oksidasyonudur. Azot havadan oksijenle birlikte alınır, havanın %79'u N₂ ve %21'i O₂ olduğu kabul edilmektedir. Havada %79 oranında bulunan azot, NO_x'in esas kaynağıdır. Azot ile oksijen değişik şartlarda tepkimeye girerek azot oksit (NO_x) ürünler oluşmaktadır. Azotoksitlerin oluşumu alev sıcaklığının 1800°K'in üzerinde kalış süresi, yeteri O₂ bulunan bölgelerdeki maksimum sıcaklık ve mevcut O₂ ile N₂ miktarına bağlıdır [Altın,1998].

Dizel motorlarında NO₂'in düşük seviyelerinin değişmez emisyonu yüksek toksit ve fotoreaktif oluşundan dolayı önemli bir problemdir [Pipho, vd. 1991]. Azot oksitleri gözlerde ve solunum sisteminde tahriş edici özelliklere de sahiptir. NO, kandaki hemoglobinle birleştiği vakit zehirlenmeye sebep olmaktadır. Ayrıca akciğerlerde kalıcı arızalara yol açmaktadır. Sağlık yönünden bu olumsuz özelliklerin yanında kontrol altına alınabilme ve azaltılması da oldukça zordur. NO_x emisyonlarının düşürülmesi için çevrimde silindir sıcaklığının düşmesi ile gerçekleşebilir. Bu da sıkıştırma başında hava sıcaklığının düşmesi, ateşleme zamanının gecikmesi, ısınan yerlerin kontrolü ile yüksek ısı hallerinin kontrol edilmesi ile mümkün olabilir [Karimi, vd. 1993]. Silindir içerisindeki oksijen konsantrasyonunun artması ile azot oksit emisyonu artmaktadır. Yakıtın püskürtme zamanının uzaması oksijen konsantrasyonunu artırmaktadır.

Motorlarda yanma yüksek basınçlarda oluşurken alev reaksiyon bölgesi oldukça incedir ve zaman olarak da bu bölgenin süresi kısadır. Yanma işleminde yanmış gazlar

bir yüksek sıcaklığa kadar sıkıştırıldıktan hemen sonra silindir basıncı düşer. Böylece alevin gerisindeki gazlardan NO oluşumu, alevin ön tarafında oluşan NO'e de etki eder. Bundan dolayı O, O₂, OH, H ve N₂'un konsantrasyonu, denge sıcaklığı ve NO oluşum işlemleri yeniden yanma ile mümkündür [Uyehara, vd. 1991].

Yanma başlangıcı sırasında NO meydana gelmez. Yanma sonucu oluşan yüksek basınç ve sıcaklık peryotlarında NO oluşumu başlar. Karışımın erken tutuşması basınç, sıcaklık ve NO oluşumunu yükseltir. Genişleme sırasında basınç düştüğü için oluşan NO değişmeden kalmaktadır. Alevdeki azot oksitlerin oluşumu, öncelikle yanmış gazların özelliklerine bağlıdır ve böylece Zeldovich reaksiyon mekanizması ön plana çıkar. Yanmanın stokiyometrik oranda karışım ile olduğu kabul edilir ve NO oluşum reaksiyonları aşağıdaki gibi verilir [Zeng, vd. 1993].



Alev bölgesinde oluşan NO aşağıdaki denklem yolu ile hızlı bir şekilde NO₂'e dönüşebilir.

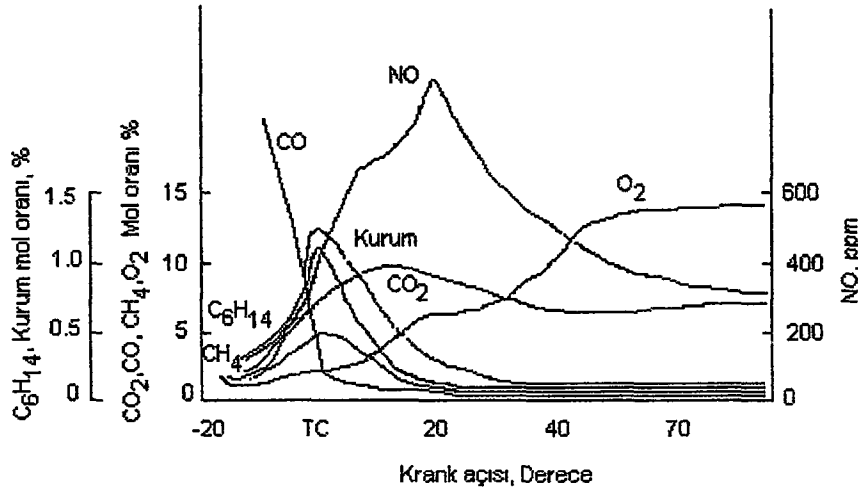


NO₂'in tekrar NO'e dönüşmesi ise;



şeklinde olur. Alevin içinde oluşan NO₂ soğutucu akışkan ile karışarak soğumaya başlar.

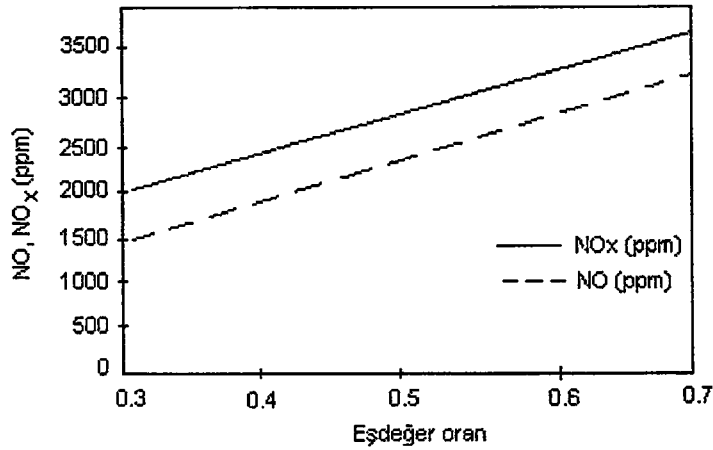
NO oluşumu, yanmanın başlangıcını takip ederek toplanmış gazlarda yükselir ve yanmış gazların eşdeğer oranında zengin karışımdan fakir karışıma doğru artar. NO'nin oluşumu yanma başlangıcından itibaren 20° krank açısında gerçekleştiği ve NO konsantrasyonunun en yüksek basınç oluşuncaya kadar düşük olduğu ve en yüksek basıncın oluşması ile yükseldiği çalışmalar sonucu ortaya konulmuştur [Heywood, 1988].



Şekil 2.3. Bir dizel motorunda gaz (NO_x , CO, CO_2 , HC) ve partikül emisyonu konsantrasyonlarının krank açısına göre değişimi [Heywood, 1988].

Şekil 2.3'te görüldüğü gibi NO oluşumu, yanmanın başlamasıyla 20° krank açısına kadar devam ederek en yüksek basınçta en yüksek seviyede olur ve daha sonra düşmektedir. CO yanmanın başlamasıyla en yüksek olur ve en yüksek basınca gelmeden önce düşmektedir. CO_2 oranı 20° krank açısında yani en yüksek basınçta yüksek olmaktadır. Yanmanın sonuna doğru oksijen miktarı yükselmektedir.

Yanma işlemi boyunca mevcut NO_2 konsantrasyonu dizel motorlarda karışımın içine girerek dönüşüm yapabilir. Dizel motorları için NO_2 / NO oranı hafif yüklerde daha çok şekillenen NO_2 ile eşdeğer oranın bir fonksiyonudur. Havada bulunan oksijenden dolayı yanma olurken yanma ısı ve dolayısıyla NO_x miktarı da yükselmektedir. Tam yük, yüksek basınç ve sıcaklıklarda stokiyometrik yanmalarda NO seviyeleri yüksektir. Eşdeğer oranın düşmesiyle NO ve NO_x miktarları düşmektedir (Şekil 2.4.). Dizel motorlarında yanma boyunca karışma işlemleri sırasında yüksek NO_2 konsantrasyonuna ulaşılabilir. NO_2 'in çoğu silindir içindeki sıcaklık yüksek iken yüksek eşdeğer oranda genişleme zamanı boyunca NO'ye dönüşür. NO_2 'in çoğu düşük eşdeğer oranlarda uzun ömürlü olup motordan dışarı atılır [Pipho, vd. 1991].



Şekil 2.4. Eşdeğer oranına bağlı olarak NO_x ve NO konsantrasyonlarının değişimi [Heywood, 1988].

Egzoz emisyonlarının azaltılması için yapılan çalışmalar NO_x için başarılı sayılmaz. Karbonmonoksit ve hidrokarbonlar düşürülürken NO_x emisyonları artmaktadır. Yakıt püskürtme basınçlarının artırılması, enjektörlerin silindir duvarına yakın yerleştirilmesi ve çaplarının azaltılması ile NO_x emisyonlarında artış gözlenirken diğer gaz emisyonlarının azalmasında iyi sonuçlar alınmıştır [Schwalb, vd. 1992].

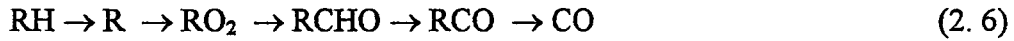
2. 2. 1. 2. Karbonmonoksit emisyonları

Karbonmonoksit (CO) emisyonları içten yanmalı motorlarda hava/yakıt eşdeğer oranı ile ilgilidir. Yanma işlemi sırasında yakıtın tam yanmamasından kaynaklanır. Gaz sıcaklığının düşük olması, yeterli oksijenin bulunmaması ve CO₂'e dönüşüm süresinin kısa olmasından dolayı yanmanın tamamlanmamış olması CO miktarını artırır. Zengin karışımlar için egzozdaki CO, giren yakıt miktarı yükselirken yükselen eşdeğer oranı ile düzenli bir şekilde yükselir. Fakir karışımlar için egzozdaki CO konsantrasyonu eşdeğer oran ile az miktarda değişir.

Karbonmonoksit gazı renksiz, tatsız ve kokusuz bir gazdır. Bu gaz zehirleyici bir özelliğe sahiptir. CO vücuda solunum yolu ile girdiğinde kandaki alyuvarlar

tarafından absorbe edilerek kan oluşum mekanizması bozulur. Az miktarda teneffüs edilen CO gazı baş dönmesi, bulantı ve görmede bulanıklık meydana getirir. Çok miktarda teneffüs edilince CO gazı öldürücü özelliği gösterir [Seebold, 1989]. İnsan kanındaki hemoglobin ile birleşerek oksid hemoglobin veya karboksihemoglobini oluşturarak kana ve dolayısıyla insan vücuduna zarar verir.

CO oluşumu hidrokarbonun yanma mekanizmasında bir kaç reaksiyon basamağında meydana gelir. CO oluşum reaksiyonu aşağıdaki şekilde verilmektedir [Heywood, 1988].



Burada R hidrokarbon kökü olarak kullanılmıştır. Yanma işleminde oluşan CO oksitlendikten sonra düşük oranda CO₂'e dönüşür. HC ve havanın yanma reaksiyonu ile CO oksitlenerek CO₂'e dönüşür.



Yüksek sıcaklık ve basınçta karbon - oksijen - hidrojen kapalı şartlar altında dengelenir. Böylece yanmış gazlarda CO konsantrasyonu dengesi tamamlanır.

Motorlarda hava yakıt oranının CO üretimini önemli ölçüde etkilediği açıklanmıştır. Bu oranın küçük değerlerinde CO emisyonu maksimum seviyede olmaktadır. Buna karşılık yukarıda da bahsedildiği gibi NO emisyonu minimum değerdedir. Hava/yakıt oranının büyük değerlerinde ise bunun tersi görülmektedir [Borat, vd. 1994]. Karbon monoksit oluşumu karbon ve hidrojen ihtiva eden yakıtların oksijenle oksidasyonundan kaynaklanır. Çıkan ürünlerin parçalanması ile CO oluşmaktadır.



Karbonmonoksitin CO₂'e dönüşmesinde OH kökü önemli rol oynar. Bu kök aşağıdaki reaksiyonla oluşur.



Püskürtme sırasında fakir karışımlarda CO₂ oluşumu tamamlandığı halde CO tamamlanmayıp sınırdan kalır. Sıcaklık ve basınç yükseldikçe oksidasyon reaksiyonlarına bağlı olarak CO konsantrasyonları artar. Alevin çekirdek kısmında ise CO yüksek oranda oluşmaktadır. Yakıt hava oranı kontrol altında tutulduğu oranda CO emisyonu azaltılabilir. Dizel motorlarda benzinli motorlara göre CO emisyonu düşük oranlarda seyretmektedir.

2.2.1.3. Hidrokarbon (HC) emisyonları

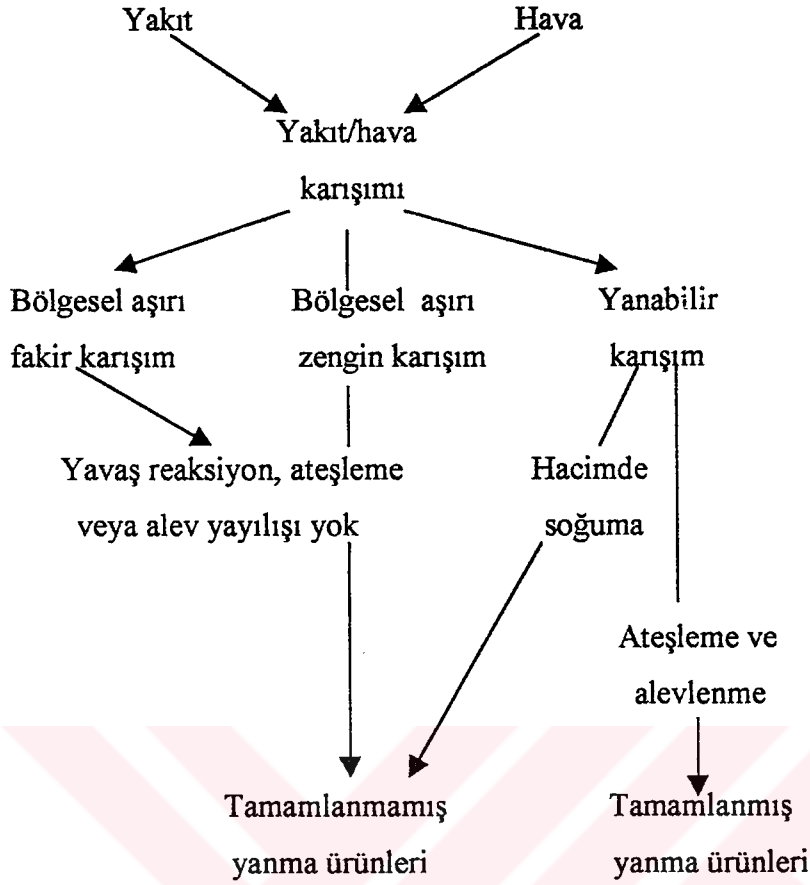
Dizel motorlarında hidrokarbonlar, hidrokarbonlu yakıtların eksik yanması sonucu meydana gelirler. Egzoz gazlarındaki yanmamış hidrokarbon derecesi karbon atomlarının milyon mertebesindeki kısımlardan toplam hidrokarbon konsantrasyonu ile ifade edilir. Dizel motorları, egzoz gazlarında hidrokarbon veya organik emisyonlarının geniş bir kısmını ihtiva ederler. Egzoz gazların bileşiminde bulunan hidrokarbonların tamamı toplam hidrokarbon olarak adlandırılır. Bu hidrokarbonların bir kısmı etkisiz olup fotokimyasal görüş noktasında reaktif değildirler. Diğerleri ise partikül üretiminde yüksek derecede reaktifdirler. Yapılarına göre 100'den daha fazla farklı hidrokarbon mevcuttur. Motorlu taşıtlar tarafından üretilen egzoz gazındaki hidrokarbon yakıt sisteminden buharlaşan yakıtın tam yanmayışından oluşmaktadır. Hidrokarbon emisyonlarının büyük bir kısmı sağlığa zararlı değildir fakat onların bir kısmı pis kokulu olup gözleri ve boğazı tahriş eder [Asmus,1992].

Yakıtın bileşimi, organik emisyonların büyüklüğü bakımından önemli derecede etkili olur. Hidrokarbonlar genellikle alkanlar, alkenler ve aromatikler diye üç ana gruba ayrılır. Diğerleri bu üç grubun bileşenleri şeklindedir. Yüksek oranlarda olefin ve

aromatikleri bulunduran yakıtlar daha yüksek reaktif hidrokarbonlar üretirler [Seebold, 1989]. Egzoz gazında bulunan organik bileşimlerinin çoğu yanma işlemi boyunca erime sentez oluşumu gösteren yakıtlar da mevcuttur. Egzoz gazında karboniller, fenoller ve düşük molekül ağırlıklı aldehit ve alifatik ketonlar da bulunmaktadır. Ayrıca buharlaşabilen aldehitler de bulunur ve bu aldehitler solunum yollarında tahriş edici rol oynar. Fenoller de kokulu ve tahriş edici olup seviyeleri aldehit seviyelerinden daha düşüktür. Bazı hidrokarbonların kansere sebep oldukları da bilinmektedir [Seebold, 1989]. Benzen gibi aromatik hidrokarbonların da belirli tip kanserlerde etkili oldukları bilinmektedir [Borat, vd. 1994].

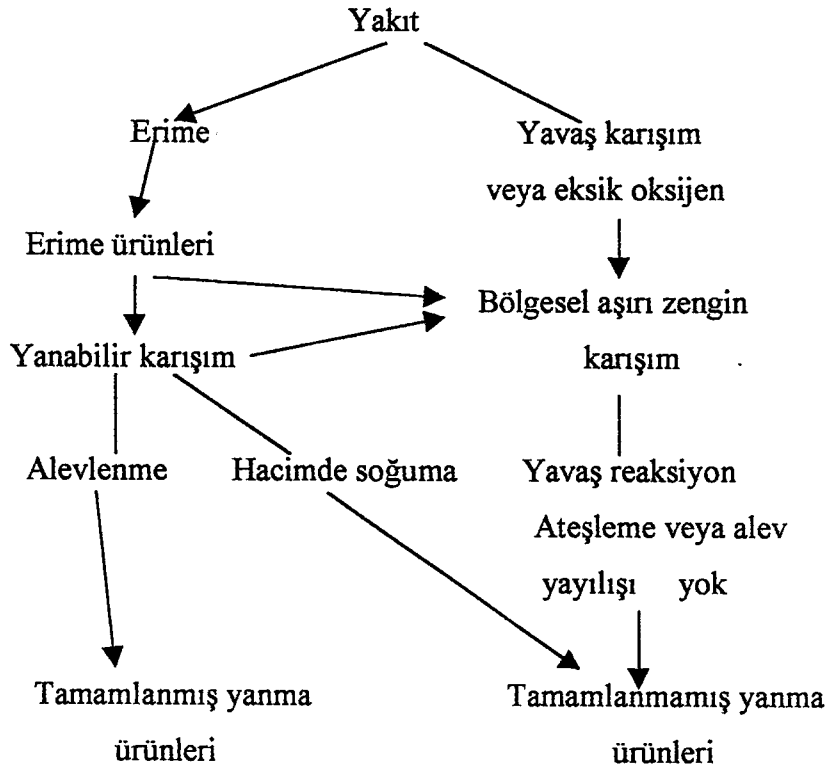
Dizel motorlarında hidrokarbon emisyon seviyeleri çalışma şartları ile büyük bir oranda değişmektedir. Motorun boşa ve hafif yükte çalışması, tam yükte çalışmasından daha yüksek oranda HC emisyonları üretir. Bununla beraber motora aşırı yakıt yüklendiği zaman HC emisyonları yükselir. Motorun hafif yük altında çalışması halinde zengin karışım HC emisyonlarının önemli bir kaynağıdır. Silindirin cidar sıcaklığı da HC emisyonunu etkiler ve cidar soğuması sonucu eksik yanmadan dolayı HC emisyonu yükselir. Hidrokarbonların oksidasyonu, yanmadan sonraki sıcaklığa, yanmış gazların silindir ve egzoz manifoldu içerisinde kalma süresine ve oksijen içeriğine bağlı olarak değişir [Willcock, vd. 1993]

Frank ve Heywood [1991], motorun soğutma suyu ile yağlama yağının sıcaklığının değişimini sağlayarak pistonun sıcaklığını arttırmak suretiyle HC emisyonlarının oranını düşürmüşlerdir. Hidrokarbon emisyonları, motor yağı ve soğutma suyunun 40°C'tan 90°C'ye çıkması halinde %30 oranında azaldığını ifade etmektedirler. Düşük sıkıştırma sıcaklıkları, basınç ve gecikmiş enjeksiyon zamanı HC oluşumunda önemli rol oynar. Çevrimden çevrime önemli değişimler olduğu zaman HC emisyonları daha belirgin bir şekilde ortaya çıkar. Yanma zamanında içeriye alınmış karışım tamamen yanmıyorsa, hidrokarbon emisyonları yanmamanın bir yüzdesi olarak yükseliş gösterir.



Şekil 2.5. Tutuşma gecikmesi periyodunda püskürtülen yakıtın HC mekanizmasının şematik gösterilişi [Heywood, 1988].

Şekil 2.5. tamamlanmamış ve tamamlanmış yanma ürünlerinin oluşumunu şematik olarak göstermektedir. Gecikmiş bir tutuşma periyodunda yakıtın hava ile karışması sırasında bazı bölgelerde fakir, bazı bölgelerde püskürtmenin yavaş ilerlemesinden dolayı zengin karışım oluşur. Zengin karışimli bölgelerde tutuşma kendi kendine olur, buna karşılık fakir bölgelerde daha geç tutuşma olmaktadır. Erken tutuşan bölgelerde alev ilerlerken yanma hava ile karışana kadar devam eder. Genişleme zamanı başladığı vakit zengin karışimli bölgelerde yanma tamamlandığı halde fakir bölgeler tamamen yanmadan egzoz periyoduna kadar uzanır. Bundan dolayı egzoz emisyonunda yanmasını tamamlamayan yanma ürünleri ortaya çıkar.



Şekil 2. 6. Yanma sırasında püskürtülen yakıtın HC oluşum mekanizmasının şematik gösterilişi [Heywood, 1988].

Şekil 2.6'da yakıt hava karışımı sırasında hızlı oksidasyon ve yakıtın erime ürünlerinin hava ile yavaş karışması sonucu zengin karışım oluşmasına sebep olur. Yavaş reaksiyon ve hacimde soğuma gibi haller tam yanma sağlanmadan egzoz periyodunda yanmış ve yanmamış yakıt ile erime ürünleri dışarı atılarak HC oluşumuna yol açmaktadır [Heywood,1988].

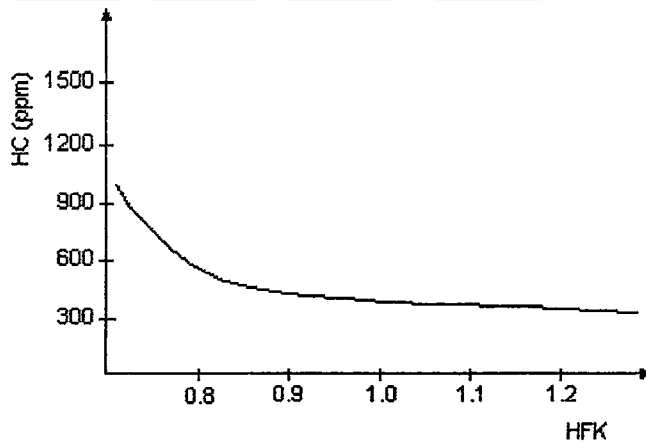
Şekil 2.5. ve Şekil 2.6'da görüldüğü gibi normal çalışma şartları altında dizel motorlarındaki hidrokarbon emisyonlarının iki büyük sebebi vardır. Bunlardan biri attutuşma gecikmesi periyodu boyunca fakir karışımdan dolayı zayıf yanmadır. Diğer bir sebebi de yanma işleminin gecikmesinde düşük hızla enjektör memesini terk eden yakıtın fakir karışımı altında HC oluşumudur [Heywood,1988].

Hidrokarbon emisyonları yanmamış hidrokarbonlar ve kısmen yanmış hidrokarbonlardan ibarettir. Hidrokarbonlar 52°C'de çözülebilir organik kısımların oluşumu sırasında is partikülleri içinde absorbe edilir veya yoğuşabilir. Cidarların önündeki alevin sönmesi ile yanmamış hidrokarbon ve karbon partikülleri beraberce

oluşur. Fakir bir dağılım ve yakıt damlacıklarının boyutunun büyük oluşu da diğer bir HC ve karbon oluşum kaynağıdır [Horrocks, 1993].

Yanmamış HC üç kaynaktan meydana gelir. Bunlardan biri yayılı alevin önündeki zayıf karışım, diğeri ise meme boşluğunda ve silindir hacminin genişlemesi boyunca sönmüş zengin karışımıdır. HC emisyonlarında çatlak hacimler olarak isimlendirilebilen piston segmanları etrafındaki boşluk, süpab başları ve enjektörlerin etrafındaki boşluklar gibi hacimlerinin etkisi çok önemlidir. Bu boşluklar yanma odasının içinde bulunmaktadır. Hidrokarbonları üreten mekanizma çatlak hacim aralığında alevin sönmesi ve böylece çatlaklarda HC'ların tutulmasıdır [Allen, vd. 1994]. Daha yüksek sıkıştırma oranı ve basıncı ile çatlak hacimlerinin yanma odasının hacmine oranı da HC'ları etkiler. HC emisyonları yük ve hıza da bağlıdır. Hava fazlalık katsayısı ile az oranda değişir [Seebold, 1989]. Ağır yüklerde HC emisyonu az ve hafif yüklerde en büyüktür.

Artan yakıt miktarı ile yani zengin karışımında oksijen konsantrasyonu düşmektedir. Fazla yakıt sebebiyle yüksek sıcaklık oluşmakta ve soğutma suyu ile yağlama yağına ısı geçişi artmaktadır. Sonuçta yanma reaksiyonlarında azalma olur ve hidrokarbon oranında yükselme görülmektedir. $HFK > 1$ ise fakir, $HFK < 1$ ise zengin $HFK = 1$ ise stokiyometrik karışım oluşmaktadır. Fakir karışımında HC oranı düşük, zengin karışımında ise yüksek olmaktadır (Şekil 2.7.).



Şekil 2.7. HC emisyonlarının hava fazlalık katsayısı ile değişimi.

2.2.2. Partikül emisyonları ve etkileri

Dizel motorlu araçlar daha yüksek yakıt verimlerinden dolayı benzinli araçlara oranla yakıtın birim hacim başına %20 - 40 daha fazla yol alırlar. Çünkü dizel yakıtı benzinden %15 fazla enerji ihtiva eder. Buna karşın dizel motorlar kurşunlu benzin ve katalitik tutucular kullanmayan benzinli motorlardan %30 daha fazla duman çıkarırlar.

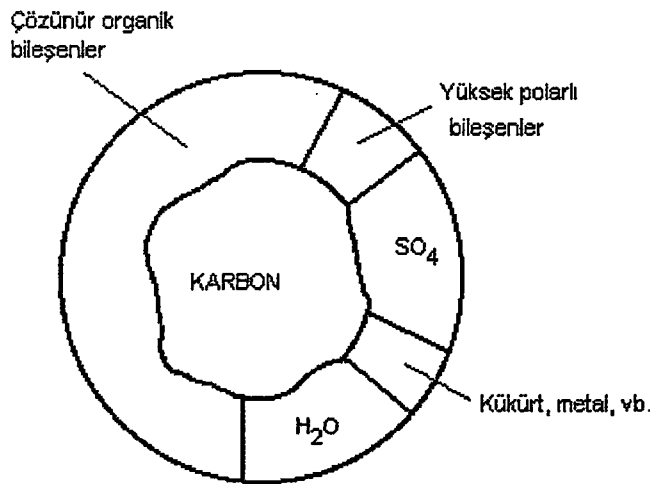
Dizel partikülleri içinde yakıtın kısmi yanmasından oluşan HC emisyonları absorbe edilmektedir. Dizel motorlarından oluşan partiküller çok ince dağılmış, yanmadan kaynaklanan karbonlu taneciklerden oluşurlar. Partiküllerin içindeki uçucu maddeler karbon taneciklerine yapışan, buharlaşma noktaları çok yüksek olan hidrokarbonlardan meydana gelir ve çözünen organik maddeler olarak bilinirler. Bunlar da geniş oranda teneffüs edilebilen, akciğerlerde tümör oluşumuna sebep olan ve akciğer boşluklarında saklanabilen aromatik bileşenleri ihtiva ederler. Dizel partiküllerinin sağlık ile ilgisi, bu partiküllerde absorbe edilen poliaromatik bileşenlerin oluşu ve birbirlerine tesir etmesinden kaynaklanır [Seebold, 1989].

Atmosferik dizel partiküllerinin kütle ortalama çapı 0.1 mikron'a kadar düşük olabilir ve bu partiküller solunumla ilgili organlara derinlemesine nüfuz edebilirler. Katı maddelerin varlığı, akciğerlere ait temizleme mekanizmasını yavaşlatabilir. Böylece toksik maddeler uzun sürelerde hassas olan dokular ile temas ederler. Dizel partikülleri içindeki kimyasal karakterli hidrokarbonlar, genlerin mutasyona uğramaları ve salgın hastalıklar gibi tehlikeleri doğurmaktadır. Dizel partiküllerden oluşan poliaromatik bileşenlerin gen öldürücü olduğu ortaya çıkmıştır. Filtresiz egzozu maruz bırakılan farelerin hepsinde akciğer tümörlerinin oluştuğunu araştırmacılar tarafından belirlenmiştir [Seebold, 1989]. Yine bir hayvan türünün açığa çıkan dizel dumanı ile tümör oluşumunun doğruluğu arasındaki sebep-etki ilişkisini ve bunun özellikle partiküllere bağlı olduğunu ve poliaromatik bileşenlere bağlı olmadığı gösterilmiştir. Dizel egzozlarından gen ölüm riski, diğer kaynaklardan daha yüksektir. Buna yakın olan sigara dumanı da aynı etkiyi göstermektedir [Seebold, 1989].

2.2.2.1. Partikül emisyonları

Dizel partikülleri genellikle yanma esnasında karbonlu maddeleri ihtiva eden bazı organik bileşimlerin absorbe edildiği emisyonlardır. Partiküllerin çoğu hidrokarbonların tam yanmamasından meydana gelmektedir. Partikül maddelerinin bileşimi motor egzozundaki şartlara bağlıdır. 500°C'nin üzerindeki sıcaklıklarda yaklaşık partikül küreciğinin çapı 15 ile 30 nm arasında değişen bir çok küre veya karbon küreciklerinin bir yığını olarak görülmektedir. Sıcaklığın 500°C'nin altına düşmesi halinde partiküller yanmamış hidrokarbon, oksidasyona uğramış hidrokarbon (ketonlar, eterler, organik asitler) ve polinükleer aromatik hidrokarbonlar ihtiva eden yüksek molekül ağırlıklı bileşimler halinde yoğunlaşır ve tabaka haline gelirler. Şekil 2.8'de görüldüğü gibi partikülün yapısı, karbon taneciklerine sülfatlar, metal vb. oksitler, nem, yüksek polarlı bileşenler ve organik bileşenlerin yapışık olmasından meydana gelmektedir. Yoğuşmuş olan kısımlar sülfür dioksit (SO₂), azot dioksit (NO₂) ve sülfürik asit (H₂SO₄) gibi inorganik türler ihtiva ederler [Davies, vd. 1993].

Tek partiküller kürecik zincirleri halinde meydana çıkarak dizilirler. Bu dizilişler kümeleri meydana getirirler. Kümeler dört bine kadar kürecik ihtiva edebilirler. Küreciklerden oluşan partikül boyutları iki boyutlu olarak görüldüğü gibi tek boyutlu bir kompleks şeklinde de görülebilir.

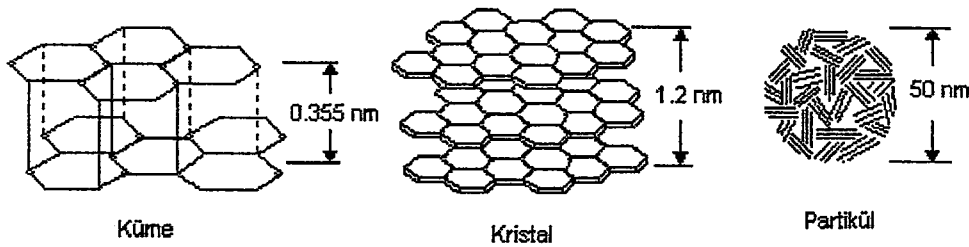


Şekil 2.8. Dizel egzoz partikülünün kimyasal yapısı [Seebold, 1989].

Dizel partikül oluşumu, yakıtın cinsine ve motorda sıcaklık ile hava fazlalık katsayısına bağlıdır. Dizel partikülü veya is üretimi alevin çevreye yayılması ile zengin karışımda ve yüksek sıcaklıkta daha fazla olur. Ayrıca hız ve yüke bağlı olarak da değişmektedir. Partikül emisyonu enjeksiyon basıncının artması ile azalmaktadır [Horrocks, 1993]. Partiküllerin oluşumunda yanmamış yakıt, yanmamış yağ ve yanma ürünleri önemli rol oynamaktadır. Özellikle yağlama yağı partikül oluşumunda önemli derecede etkilidir. Yağlama yağı segmanlar vasıtasıyla yanma odası içine girer ve dizel yakıtına göre vizkozitesi daha yüksektir. Karbon hidrojene göre daha geç yandığı için partikülün çekirdek kısmı yağlama yağı tarafından oluşturulmaktadır.

Partikül boyutu ve yüzey alanı hava fazlalık katsayısına bağlı olarak değişir. Dizel partikülleri yanma sistemlerinin sahip olduğu farklı kaynaklarına rağmen aynı görünüme sahiptir. Partikül oluşumu hidrojen ile karbon oranının 2 olması ile yakıt moleküllerinde başlar. Karbon atomları kümeleşmiş olarak yüzey merkezli hegzagonal paketler halinde dizilirler. Sıcaklık ile partiküllerin sıralanışında grafit benzeyen yapı düzenli bir şekilde düşer. Yani partiküldeki grafitleşme oranı sıcaklığa bağlıdır. Yeni oluşan partiküller yüksek bir hidrojen içeriğine sahiptir ve partikül içinde tabii olarak karbon bağlarının varlığı sözkonusudur.

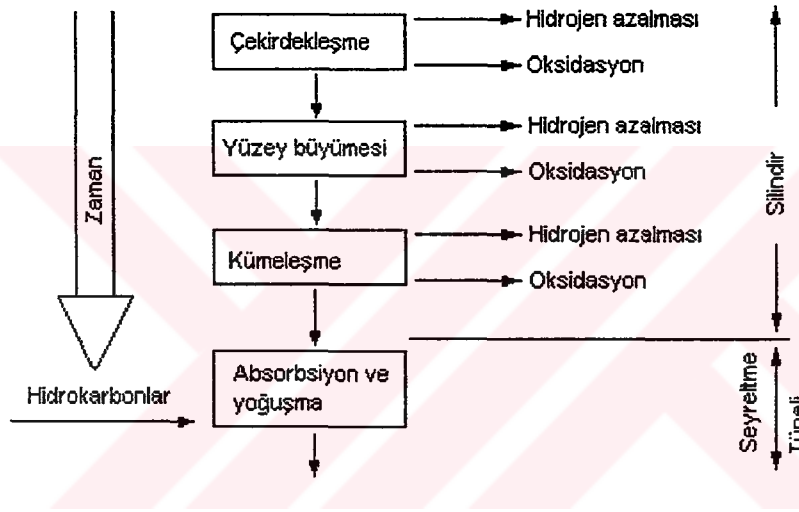
Bir dizel partikülü kafes yapısı her küreciğin merkezi etrafında düzenlenmiş ortak merkezli bir lamelli yapı şeklindedir. Ortak merkezli lamellerin düzeni karbon siyahlığı yapısına benzer. Karbon atomları genel olarak küme şeklinde hegzagonal yüzey merkezli düzende birbirine bağlanır. Kümeler kristal şekilli tabakalardan oluşurlar (Şekil 2.9). Her kürecikte 1000, kristal sırasında 2 ile 5 küme vardır. Tek bir kürecik 10^5 ile 10^6 arasında karbon atomu ihtiva etmektedir [Heywood, 1988].



Şekil 2.9. Karbon partikülünün yapısı [Heywood, 1988].

Dizel motorlarında en yüksek partikül konsantrasyonu çok zengin olan her yakıt hüzmesinin çekirdek bölgesinde bulunur. Partikül konsantrasyonu yanma başlangıcından hemen önce hızlı bir şekilde yükselir. Enjektör deliğine yakın yakıt hüzmesinin eksenindeki partikül konsantrasyonu da önemlidir. Aşırı derecede zengin yakıt çekirdeğindeki karbon, yüksek basınçlı olarak alev çekirdeğine tesir etmektedir. Piston çukurunun dış çapına yakın hüzmeye ve silindir cidarında önce yükselir, daha sonra yavaş yavaş düşer (Şekil 2.10).

Silindir içinde oluşan partikül hava-yakıt oranı, basınç ve sıcaklık gibi değişkenlere bağlı olarak okside olmaktadır.



Şekil 2.10. Silindir içindeki partikül oluşumunun şematik olarak gösterilmesi [Heywood, 1988].

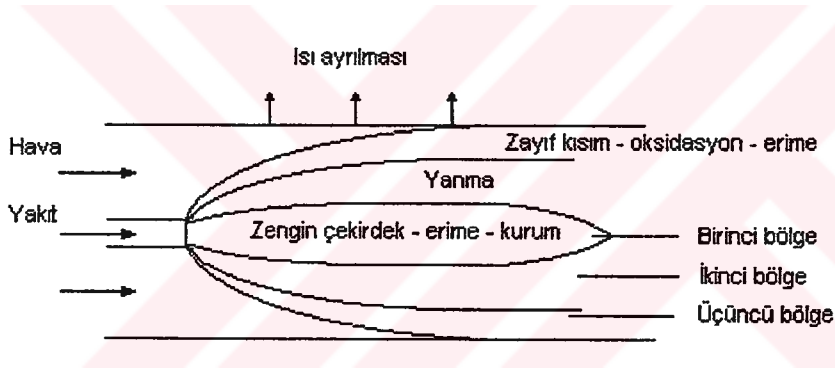
Yakıt hüzmesinden uzak kurum birikimleri, hüzmeyi merkez ekseninden yükselen mesafe ile hızlı bir şekilde düşer. Yanma işlemi boyunca silindir içindeki kurum konsantrasyonu, egzozu önceden okside eden şekillenmiş kurumun tamamını ortaya çıkarır. Hava fazlalık katsayılarında partikül birikimleri bir girdap oluşturan hava ile çok hızlı karıştığında daha düşük olması beklenir.

Dizel motorlarda silindir içinde yakıt enjeksiyonu sonucu yanma oluşur, fakat hava fazlalık katsayısı (HFK) sabit olarak değişir. Hava yakıt karışımı oluşurken

karışım homojen olarak yanmaz ve alev bölgesinde ara ürünlerin oluşumu yükselebilir. Alevi üç bölgeye ayırmak mümkündür [Seebold, 1989].

1. Çekirdek bölgesi,
2. Orta bölge,
3. Dış bölge

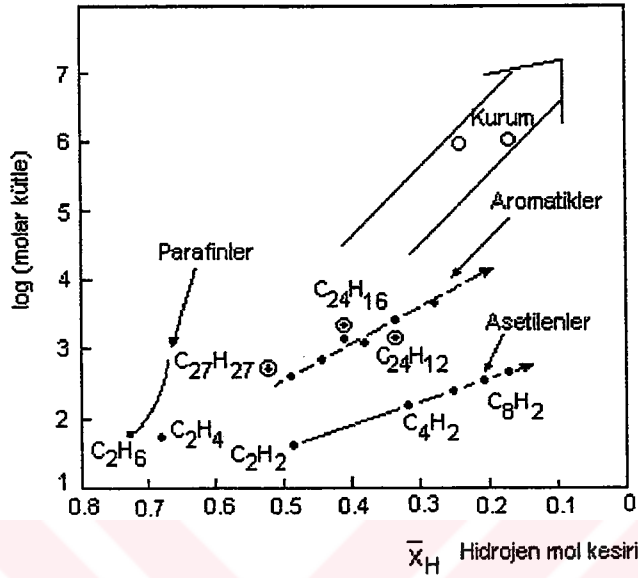
Birinci bölgede kurum oluşumuna sebep, zengin karışımdaki yakıt buharı ile yakıt zerreciklerinin bir arada bulunmasıdır. İkinci bölgede sadece zerrecikler çıkar ve kurum üretimi durur. Üçüncü bölgede ise karışım fakir olduğu için yakıtın içindeki kurum, yakıt ile beraber yanar. Egzoz sistemindeki kurum oksidasyonu is oluşumunun bir fonksiyonudur (Şekil 2.11).



Şekil 2. 11. Türbülans yayılmalı alevde kurumun oluşum ve oksidasyonu [Seebold,1989].

Yapılan araştırmaların sonucunda partikül oluşumu bazı değişmeler sonucu meydana gelmektedir. Sıcaklık tesiri ile eriyen veya oksidasyona uğrayan ürünler yoğunlaşarak yakıt moleküllerinden ayrılır. Ayrılan bu ürünler genelde doymamış hidrokarbonlardır. Bunlar gaz fazından yoğunlaşarak kurumun temeli olan ve çekirdek olarak bilinen kurum taneciğini oluştururlar. Bu taneciklerin boyutları çok küçüktür. Oluşan tanecikler katılaşır ve küme şeklinde birleşerek dizel partiküllerini oluştururlar. Bu partiküller birleşerek hidrokarbonların yüzeylerini yoğunlaştırması sonucu büyüme

olur. Partikül oluşumu sırasında molekül ağırlıklarının logaritmik değişimi ile hidrojenin mol kesrine göre değişimi Şekil 2.12’de görülmektedir.



Şekil 2. 12. Molar kütlenin, hidrojenin mol kesirinin değişiminden kurum oluşum yolları [Seebold, 1989; Homann, 1978].

Kraft [1982], dizel partiküllerinde absorbe edilmiş aromatiklerin parçacıklarının 50°C de %98'e yükseldiğini ve 200°C'ta sıfır olduğunu göstermiştir. Yine dizel partikülünde yüksek enerji bölgelerinde benzen absorpsiyonu görülmüştür. Bununla beraber sıcaklık absorpsiyona etki etmektedir.

3. DİZEL MOTORLARINDA YANMA VE EGZOZ EMİSYONLARININ TEORİK İNCELENMESİ

Dizel motorlarında emisyonların oluşumunun belirlenmesi ve minimum bir seviyeye indirilmesi için birçok deneysel çalışmalar yapılmıştır. Bunun yanında teorik yollarla da çalışmalar sürdürülmüştür. Deneysel çalışmalarda emisyon oluşumunun bazı yardımcı cihazlarla belirlenmesine ihtiyaç duyulmaktadır. Ancak bir çok cihaz ve maddi imkanlar gerektiği için bazı dezavantajlara sahip deneysel araştırmaların yanında teorik çalışmalar veya sadece model geliştirme gibi teorik çalışmalar da yapılmaktadır. Bu teorik çalışmalar, deneysel sonuçlarla karşılaştırıldığında birbirine yakın olduğu zaman emisyonların oluşumu daha kısa bir zaman içerisinde incelenerek hem maddi kayıptan ve hem de zaman kaybından kaçınılmış olur. Bu kirletici emisyon seviyelerini düşürmek için bir çok yaklaşımlar geliştirilmiştir. Bununla beraber sonuçlar hava kalite standartlarının istenilen limitleri için bir çok durumlarda uygun değildir.

Kirletici emisyon seviyelerini düşürmek için geçerli alternatifin biri, farklı yakıt veya yakıt bileşenini kullanmaktır. Bununla beraber deneysel araştırma karışıklıklarından dolayı kirleticilerin karakterini tahmin edilen performansı sınırlar. Bir deneysel çalışma yönteminde ölçümler çok zordur ve bazen de mümkün olmamaktadır. Egzoz gazındaki emisyon ürünlerinin hepsini ölçmek oldukça zordur. Bilgisayarla yapılan simülasyon programları deneysel çalışmalardaki sınırlamalara sahip değildir. Bazı durumlarda deneysel çalışmalar, matematik modelleme ve bilgisayar simülasyonu birbirleri ile paralel olursa daha anlamlı sonuçlar ortaya çıkmaktadır.

3.1. Teorik Çalışmada Yapılan Kabuller

Dizel motorlarında çok karmaşık olan yanma, bazı kabuller yapılarak basitleştirilip ve daha sonra teorik hesaplara uygunluğu araştırılmaktadır. Yanan yakıt hava karışımında iç enerji değişimi, yanmada ısı ve genişlemede iş alınması termodinamiğin birinci kanununa göre yapılmaktadır. İş ve ısı miktarının toplam iç enerji değişimi eşitliği gözönünde bulundurulmaktadır [Eastop, vd. 1993].

Taze dolgunun ve yanmış gazların özgül ısıları sabit kabul edilmiştir. Sıkıştırma ve genişleme boyunca gazların bileşimi ve stokiyometrik değişimi hesabında ortalama sıcaklıklar kabul edilmiştir. Çevrim boyunca sıkıştırmada silindir duvarlarında ısı geçişi yok kabul edilmiştir. Genişlemedeki ısı geçişi aşağıdaki eşitlik kullanılarak tahmin edilmiştir [Ruiz, 1991].

$$h = C.B^{m-1} p^m W^m T^{0.75-1.62m} \quad (3.1)$$

Burada W (m/s) ortalama piston hızına göre alınan ortalama silindir gazı hızı, p (kPa) silindir basıncı, T (°K) gaz sıcaklığı, h (W/m² °K) ısı transfer katsayısı, B (m) silindir boyutu, C bir katsayı ve m de boyutsuz bir sayı olup tablolardan seçilir.

Yakıt ve hava karışımının homojen bir şekilde içeri alındığı kabul edilmiştir. Farklı boyutlarda bir çok damlacığın silindir içerisinde olduğu kabul edilir. Silindir içerisinde buharlaşmış yakıt miktarı yanma hızını tayin ettiği için bu miktar üzerinde hesaplamalar yapılmıştır.

Dizel motorlarında yakıt püskürtüldüğü anda yanma başlamaz, tutuşma gecikmesi periyodundan sonra başlar. Bu gecikme zamanı aşağıdaki eşitlikle hesaplanır.

$$\tau = 17.68 (S N/100)^{3.402} P^{-1.7} \exp (3800/T) \quad (3.1a)$$

Burada P (kPa) basınç, T (°K) silindirin genişleme sırasındaki sıcaklık ve SN yakıtın setan sayısıdır.

Bu gecikmeden sonra tahmin edilen yanma oranı, genişlemede yanmamış kütle ile orantılı olacaktır [Ruiz, 1991].

$$\frac{dm_{\text{yanmış}}}{dt} = \frac{m_{\text{yanmamış}}}{\tau} \quad (3.1b)$$

Yanmadan sonra gazların oluşumunun belirlenebilmesi için kimyasal dengelerden yararlanılmıştır. Kimyasal dengenin yeterli olmadığı durumlarda gazların hızından yararlanılmıştır. Çevrim boyunca emme süpabı ÜÖN'da açıldığı ve AÖN'da kapandığı kabul edilir. Egzoz süpabının da ÜÖN'da kapandığı kabul edilir. Çevrimin

tamamlanmasında emme ve egzoz manifoldlarındaki basınç ile sıcaklığın düzgün bir şekilde olduğu kabul edilmiştir.

3.1.1. Silindir içinde yanma işlemi

Silindir içerisine püskürtülen yakıt damlacıklar halinde içeri girer. Püskürtülen yakıtın jeti silindir içinde türbülanslı gaz jeti olarak kabul edilmiştir. Dizelerde yüksek basınç ve sıcaklıkta meme ucundan 10 mm içinde yakıtın tamamı buharlaşacak şekilde damlacıklar halinde silindire girer. Bu damlacıkların hızları büyüklüklerine, püskürtme hızına ve içeride sıkıştırılan havanın yoğunluğuna göre değişir. Bu damlacıkların fiziksel ve kimyasal ilişkileri yok sayılmıştır [Ottikkutti, vd. 1991].

Yakıt spreyinde damlacık boyutunun dağılımı hava yakıt özellikleri yanında enjeksiyon parametrelerine bağlıdır. Püskürtülen yakıt meme çıkışında sprey halinde hava ile karışmadan ve yanmadan önce küçük damlacıklar şeklinde olur. Bu damlacıklar karışmadan ve yanmadan önce buharlaşmalıdır. Damlacık buharlaşma hızının hesaplanmasında belirli yerlerdeki damlacıkların durumu ele alınır. Yakıtın püskürtüldükten hemen sonra buharlaşması ve bu buharlaşma yardımı ile yanma hızı bulunarak buharlaşma hızlarının bulunmasına yardımcı olmuştur. Damlacıkların buharlaşması, sürüklemenden dolayı damlacığın yavaşlaması, havadan damlacığa ısı geçişi ve damlacıktan uzak buharlaşan yakıtın kütle transferinden dolayı sınırlanır. Isı transferinden dolayı damlanın sıcaklığı, yakıtın buhar basıncı ve buharlaşma oranı yükselir.

Püskürtme ile yanmanın başlaması arasındaki süre ateşleme gecikmesi olarak tanımlanır. Silindir içindeki karışımın yanabilmesi, karışımın sıcaklığı, basıncı, hava yakıt oranı ile hızı ve kimyasal yapısı gibi etkenlere bağlıdır. Karışımın karışma hızından ziyade buharlaşma hızlarından yararlanılarak yanma hızları hesaplanmıştır.

Yakıt sıkıştırılmış olan havanın içine püskürtüldüğü zaman ateşleme hemen olmaz. Bu karışımın bazı bölgeleri zengin, bazı bölgeleri de fakir karışım bölgeleri şeklinde olur. Zengin bölgelerde yanma daha erken başlar, diğer bölgelerde ise oksijen konsantrasyonuna bağlı olarak geç başlar. Bundan dolayı farklı ateşleme bölgeleri oluşur. Bunun için yakıt spreyinde oldukça homojen bir karışım elde etmeye çalışılır.

Enjektör memesinden uzak bir mesafede yakıt konsatrasyonu düşer, yani yakıt spreyinin ön tarafındaki kısmın konsantrasyonu düşüktür [Befrul, vd. 1991]. Bundan dolayı meydana gelen yanma, silindir içinde yakıtın hava ile karışımı ve ateşleme arasındaki zamanın değişimine bağlı olmaktadır.

3.1.2. Emisyon ürünlerinin teorik hesaplanması

Bir dizel motorunda emisyon ürünleri bir yanma sonucu ortaya çıkmaktadır. Yanma işlemi için teorik bir hava miktarına ihtiyaç vardır. Bu teorik havanın miktarı yakıtın bileşimine bağlı olarak değişmektedir. Emisyon ürünlerinin hesaplanabilmesi için de gaz bileşiminin bilinmesi gerekir. Basit bir yanma işleminde karbon ve oksijenin reaksiyona girmesi ile karbondioksitin meydana gelmesi sözkonusudur. Motorlardaki yanma ise yüksek basınç ve sıcaklıklardan dolayı yanma ürünleri molekül ve atomlarına ayırır. Bu ayrışmadan dolayı ürünlerin sıcaklığı düşmektedir. Bu enerji tekrar ayrışma işine harcanır.

Tatbik edilen hava ile teorik olarak hesaplanan hava miktarı oranına hava fazlalık katsayısı denir.

$$HFK = \frac{\text{Gerçek hava tüketimi}}{\text{Teorik hava miktarı}}$$

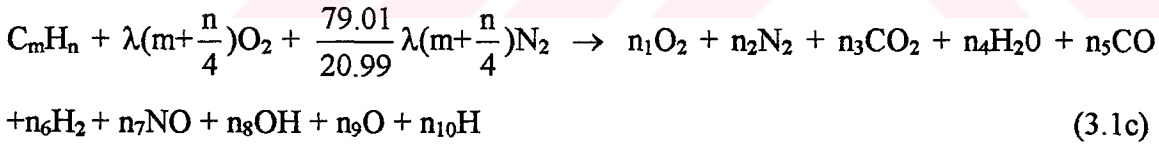
Eğer $HFK > 1$ ise karışım iyi olmadığı için bazı yerlerde zengin karışım olabilir. Bunun için tam yanma yerine eksik yanma ortaya çıkabilir. $HFK < 1$ ise zengin karışım oluşmuş ve oksijen yetersizliği sebebiyle CO teşekkül eder. Yanma sırasında yakıt ile hava fakir karışımdan zengin karışıma kadar değişik hızlarda reaksiyona girdiği halde emisyon ürünleri hesaplanırken reaksiyon stokiyometrik kabul edilir.

Yanma olduktan sonra reaksiyona giren yakıt ile hava ve yanma ürünleri arasındaki enerji dengesi reaksiyon sıcaklığı ile gazın bileşimine göre kurulur. Emisyon ürünleri teorik olarak hesaplandığı zaman yanma reaksiyonundaki kimyasal dengeden yararlanılır [Eastop, vd. 1989].

Dizel motorlarda yanma sonucu ortaya çıkan ürünlerin bileşiminin hesaplanması aşağıdaki temele dayanır:

1. NO ve diğer azot 1000°K veya daha yüksek sıcaklıklardaki kimyasal dengelerden oluşur [Sato, vd. 1991].
2. Yanma ürünleri olarak 10 bileşim şeklinde alınır. Oksijen (O₂), azot (N₂), karbondioksit (CO₂), karbon monoksit (CO), su (H₂O), hidrojen (H₂), azot monoksit (NO), hidroksil (OH), atomik oksijen (O) ve atomik hidrojen (H).
3. Yakıt olarak kullanılan C_nH_m hidrokarbon tipi ile N₂ ve O₂'den oluşan hava karışımından ibarettir.
4. Bütün kimyasal ürünler tam gazdır.

Yanma reaksiyonuna giren yakıt ve hava ile bu emisyon ürünleri denge halinde olduğu kabul edilir. Silindir içerisinde kimyasal reaksiyona giren yakıt C_nH_m ve gereken hava (O₂ + 3.773 N₂) şeklinde olduğuna göre yanma denklemi yazılabilir. Hava içinde 0.044 oranında argon bulunur. Buna göre silindir içindeki adyabatik sıcaklığı ve karşılık gelen basınçta n mol yakıt ve n/φ oranı (φ = 1/λ) kadar da havanın reaksiyona girmesi ile bir mol yanma ürününü veren denge denklemi aşağıdaki gibi yazılabilir [Sato, vd. 1991].



Kimyasal reaksiyonlardan önce ve sonra dört atomun kütle dengesinden aşağıdaki eşitlikler elde edilir.

$$N_c \rightarrow n_3 + n_5$$

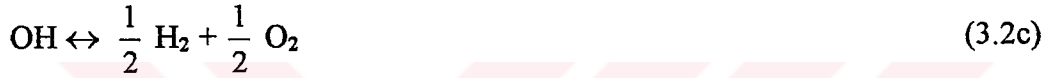
$$N_H \rightarrow 2n_4 + 2n_6 + n_8 + n_{10}$$

$$N_O \rightarrow 2n_3 + n_4 + 2n_1 + n_8 + n_7 + n_5$$

$$N_N \rightarrow 2n_2 + n_7$$

Burada $N_C = m$, $N_H = n$, $N_O = 2\lambda(m + \frac{\pi}{4})$, $N_N = 2\lambda(\frac{79.01}{20.99})(m + \frac{\pi}{4})$ olur. Zengin yanmada $n_9 = 0$, $n_8 = 0$, $n_1 = 0$, $n_{10} = 0$ ve fakir yanmada $n_9 = 0$, $n_8 = 0$, $n_{10} = 0$, $n_5 = 0$ olur. Bu denklemde $n_1, n_2, \dots, n_{10}$ yanma ürünlerinin mol oranlarıdır. Bu denklem atomik kütle ve kimyasal denklemlerin yardımı ile mol hızları denklemleri yazılabilir. Denge sabitlerinin denklemleri de yazılırsa bilinmeyen sayısı kadar denklem elde edilir ve katsayılar Newton Rapson metodu ile çözülebilir [Sato, vd. 1991].

Yanma ürünlerindeki ayrılma denklemleri şu şekilde olur.



Reaksiyon enerjisinin hesaplanabilmesi için yanma ürünlerinin sıcaklığının bilinmesi gerekir. Silindir içindeki yakıtın sabit hacimde yandığı ve yanma sonucu oluşan ürünlerin, reaksiyon sonucunda ortaya çıkan enerjileri denklemler yardımı ile bulunur.

3.1.3. Azot oksit (NO_x) emisyonları

Dizel motoru egzozundaki emisyon ürünlerinin içinde büyük kirlilik yapan ürünlerden biridir. Yapılan araştırma ve deneysel çalışmalar azot oksitlerin oluşumunun kimyasal dengenin dışında gerçekleştiğini göstermiştir. Enjeksiyon zamanının değişimi ile egzoz içindeki NO_x konsantrasyonunun değiştiğini bazı araştırmalar göstermiştir [Uyehara, 1991]. Azot oksit emisyonlarının belirlenmesi için NO oluşumunu

yönlendiren ve Zeldovich mekanizması olarak bilinen aşağıdaki temel denklemler kullanılmaktadır.



O_2 , N_2 , O , N , H ve OH 'nin ani konsantrasyonu kimyasal reaksiyon oranları veya diğer türlerin konsantrasyonlarında ifade edilebilir. Dizel motorlarında yanma sırasında bölgesel olarak oluşan NO , atomik oksijenin konsantrasyonuna bağlıdır. (3.4) ifadesinde oksijen molekülü yüksek sıcaklıklarda bölünerek NO 'i meydana getirir. (3.3) ve (3.4) denklemleri $\text{HFK} > 0.8$ olan normal zenginlikteki veya fakir karışımlar için geçerlidir. $\text{HFK} \leq 0.8$ ise (3.5) reaksiyonu önemlidir [Borat, vd. 1994]. Bu denklemlerin ileri yönlü hız reaksiyonları kullanılmaktadır.

Azot oksit oluşumunun tespit edilmesi ve zamana bağlı hız kontrolünü bulmak için O_2 , N_2 , O , N , H ve OH konsantrasyon dengesini takip ettiği farzedilir. Alevin son yanma bölgesinde NO oluşumu başlamadan önce esas yanma reaksiyonlarının dengeye ulaştığı kabul edilir. Yanma işleminde reaksiyonların çoğu ikili reaksiyonlardır. Reaksiyona giren molekül sayısı çıkan molekül sayısına eşit olur.



Buna göre ileri reaksiyon için artı (+) yönü şöyle yazılır:

$$R^+ = -\frac{d[\text{M}_a]}{dt} = \frac{d[\text{M}_c]}{dt} = k_1[\text{M}_a][\text{M}_b] \quad (3.8)$$

Eğer reaksiyon geri dönüşlü ise eksi alınır ve şöyle yazılır.

$$R^- = -\frac{d[\text{M}_c]}{dt} = \frac{d[\text{M}_a]}{dt} = k_2[\text{M}_c][\text{M}_d] \quad (3.9)$$

Burada k_1 ve k_2 ileri ve geri yönlerdeki hız sabitleridir. Buna göre reaksiyona giren ve çıkan ürünlerin net oranları şöyle yazılabilir.

$$R^+ - R^- = k_1 [M_a] [M_b] - k_2 [M_c] [M_d] \quad (3.10)$$

(3.3) ve (3.4) reaksiyonlarının aktivasyon enerjileri büyük olduğu için düşük sıcaklıktaki hızları çok küçüktür. NO için reaksiyon hızı aşağıdaki gibi yazılabilir [Ramos, 1989].

$$\frac{d[NO]}{dt} = k_1[N_2][O] - k_2[NO][N] + k_3[N][O_2] - k_4[NO][O] + k_5[N][OH] - k_6[NO][H] \quad (3.11)$$

Benzer şekilde N için de reaksiyon hızı yazılabilir.

$$\frac{d[N]}{dt} = k_1[N_2][O] - k_2[NO][N] - k_3[N][O_2] + k_4[NO][O] - k_5[N][OH] + k_6[NO][H] \quad (3.12)$$

diğer ürünlerin yanında [N] çok küçüktür ve buna göre $\frac{d[N]}{dt} = 0$ alınabilir. (3.12) ifadesinde [N] yalnız bırakılarak aşağıdaki eşitlik elde edilir.

$$[N] = \frac{k_1[N_2][O] + k_4[NO][O] + k_6[NO][H]}{k_2[NO] + k_3[O_2] + k_5[OH]} \quad (3.13)$$

(3.11) ile (3.13) eşitliklerin ortak çözümünde aşağıdaki eşitlik elde edilir.

$$\frac{d[NO]}{dt} = 2\{k_1[N_2][O] - k_2[NO][N]\} \quad (3.14)$$

Burada k_1 ve k_2 denklemin hız denge sabitleri olup şu değerleri almaktadır [Seebold, 1989].

$$k_1 = 1.32 \times 10^{13} \quad (\text{cm}^3/\text{mol/s}) \quad (3.14a)$$

$$k_2 = 1.181 \times T^{1.5} \exp(-3000/T) \quad (\text{cm}^3/\text{mol/s}) \quad (3.14b)$$

Yukarıdaki (3.12) ve (3.13) eşitliklerindeki O, OH ve H konsantrasyonları aşağıdaki kısmi denge reaksiyonları kullanılarak hesaplanır.



Burada k_o ve k_H denge sabitleri yalnız bırakılarak değerleri yazılır.

$$k_o = \frac{[O]}{[O_2]^{1/2}} \quad (3.17)$$

$$k_H = \frac{[OH][O]}{[H][O_2]} \quad (3.18)$$

Buna göre (3.14) eşitliği yeniden düzenlenebilir [Heywood, 1988].

$$\frac{d[NO]}{dt} = 2R_1 \frac{1 - \{ [NO]/[NO]_d \}^2}{1 + [NO]/[NO]_d R_1 / (R_2 + R_3)} \quad (3.19)$$

O, O₂ ve N₂'nin reaksiyon hızları yüksek olduğundan denge konsantrasyonları, hız kontrol konsantrasyon değerlerine eşit kabul edilir.

$$R_1 = k_1 [O]_d [N_2]_d = k_2 [N]_d [NO]_d \quad (3.20)$$

$$R_2 = k_3 [N]_d [OH]_d = k_6 [NO]_d [O]_d \quad (3.21)$$

$$R_3 = k_5 [N]_d [OH]_d = k_6 [NO]_d [H]_d \quad (3.22)$$

$$\frac{R_1}{R_2 + R_3} = k \quad (3.23)$$

Buna göre (3.19) ifadesi aşağıdaki şekle gelir.

$$\frac{d[\text{NO}]}{dt} = 2R_1 \frac{1 - \left\{ \frac{[\text{NO}]}{[\text{NO}]_d} \right\}^2}{1 + k[\text{NO}]/[\text{NO}]_d} \quad (3.24)$$

NO'in oluşum oranı yüksek sıcaklığa bağlı olduğundan ilk değer gözönüne alınınca $[\text{NO}]/[\text{NO}]_d \ll 1$ olur. O zaman (3.14) eşitliği şu hale gelir.

$$\frac{d[\text{NO}]}{dt} = 2k_1 [\text{N}_2][\text{O}] \quad (3.25)$$

Bulunan bu eşitliğe (3.15) eşitliğinin değeri yazılarak aşağıdaki ifade bulunur.

$$\frac{d[\text{NO}]}{dt} = 2 k_1 k_0 [\text{N}_2][\text{O}_2]^{0.5} \quad (3.26)$$

(3.15) ifadesinde oksijenin parçalanmasındaki reaksiyonu kısmi denge kabul ederek oksijen atomunun konsantrasyon dengesi aşağıdaki şekilde yazılır [Heywood, 1988].

$$[\text{O}] = \frac{k_0 [\text{O}_2]^{0.5}}{[\text{RT}]^{0.5}} \quad (3.27)$$

Buna göre $k_{(o)}$ da $\frac{1}{2} \text{O}_2 \rightarrow \text{O}$ reaksiyonu için denge sabiti olup,

$$k_{(o)} = 3.6 \times 10^3 \exp\left(\frac{-31.090}{T}\right) (\text{atm})^{0.5} \quad (3.28)$$

şeklinde yazılır. (3.27) ve (3.28) değerleri (3.26)'da yerine yazılırsa,

$$\frac{d[\text{NO}]}{dt} = \frac{6.10^{16}}{T^{0.5}} \exp\left(\frac{-69.090}{T}\right) [\text{O}]^{0.5} [\text{N}_2] \quad (3.29)$$

elde edilir.

Diğer bir yaklaşımla (3.3), (3.4) ve (3.5) ifadelerinde O_2 , N_2 , O , N , H ve OH konsantrasyonları kimyasal reaksiyon oranları ile ifade edilir. Diğer ürünlerin ve O_2 , N_2 , O , N , H ile OH kabul edilen konsantrasyonları her bölgede kendi dengelerindedirler ve NO 'ın krank mili durumuna göre değişim oranı sabit bölge hacminde aşağıdaki şekilde verilir [Ottikkutti, vd. 1991].

$$\frac{d[NO]}{dt} = \{2k_{1f} k_{2f} [O][N_2][O_2] - 2k_{1b} k_{2b}[NO]^2[O] + 2k_{1f} k_{3f}[O][N_2][OH] - 2k_{1b} k_{2b}[NO]^2[H]\} / \{k_{1b}[NO] + k_{2f}[O_2] + k_{3f} a[OH]\} \quad (3.30)$$

Burada k_f ve k_b (3.3), (3.4) ve (3.5) reaksiyonları için sıcaklığa bağlı olarak ileri ve geri dönüş reaksiyon hız sabitleridir. Bir dizel motorunda belirli bir yerin hacminin krank mili ile değişimi ve dolayısıyla NO konsantrasyonu her bölge için, bölgenin hacmi ile reaksiyon oranının bir fonksiyonudur. Her hangi bir yerdeki NO konsantrasyonunun değişim oranı aşağıdaki ifade ile elde edilir [Ottikkutti, vd. 1991].

$$\frac{d[NO]}{d\theta} = \frac{d[NO]_{vt}}{d\theta} - \frac{[NO]_t}{V_t} \frac{dV_t}{d\theta} \quad (3.31)$$

Burada $\frac{dV_t}{d\theta}$ bölge hacminin krank pozisyonu ile değişim oranıdır. Silindirdeki NO konsantrasyonu, gözönüne alınan bölgelerdeki NO konsantrasyonlarının toplamı ile elde edilir. NO 'ın silindir içindeki miktarı egzoz süpabının açılmasına bağlı olarak deneysel elde edilen egzozdaki NO seviyesi ile karşılaştırılır.

3.1.4. Karbonmonoksit emisyonları

İçten yanmalı motorlarda bilhassa dizel motorlarında CO oluşumunun kinetiği oldukça karmaşık bir durumdadır. Genellikle C ve H ihtiva eden hidrokarbonların oksidasyonu ile bazı ara ürünler oluşmaktadır. Oluşan bu ara ürünlerin parçalanması sırasında CO meydana gelmektedir.

Karbonmonoksit ve yanmamış hidrokarbonların emisyonları karışım eşdeğer oranı ile değişmektedir. Hava yakıt oranının küçük değerlerinde CO emisyonu en yüksek değerde olur. Buna karşılık NO emisyonu en küçük değerdedir. Hava/yakıt oranının büyük değerlerinde bunun tersi bir işlem olmaktadır. Bundan dolayı CO emisyonunu azaltmak için hava/yakıt oranını değiştirmekten ziyade motorun yapımı ile ilgili tedbirler alınır.

Yanma işleminden oluşan CO, bağlı olarak düşük CO oluşum oranında CO₂'i oksitler. Buna bağlı olarak genel oksidasyon reaksiyonları gözönüne alınır.



Eğer O, OH, O₂ ve CO₂'in dengede olduğu kabul edilirse CO'nin oluşum oranı şu şekilde ifade edilir.

$$\frac{d[\text{CO}]}{dt} = k_1[\text{CO}]_d[\text{OH}]_d + k_3[\text{CO}_2][\text{CO}] - \frac{k_2[\text{CO}_2]_d[\text{H}]_d + k_4[\text{CO}]_d[\text{O}_2]_d[\text{CO}]}{[\text{CO}]_d} \quad (3.34)$$

bu denklemin integrasyonu ilk oluşan CO'nin konsantrasyonunu verir. Burada reaksiyon hızı (3.32) ifadesi için yazılabilir. Bu hıza R₁ dersek;

$$R_1 = k_1[\text{CO}]_d[\text{OH}]_d = k_2[\text{CO}_2]_d[\text{H}]_d \quad (3.35)$$

şeklinde yazılabilir. (3.33) ifadesi için de aynı eşitlik R₂'ye göre yazılırsa;

$$R_2 = k_3[\text{CO}_2]_d[\text{O}]_d = k_4[\text{CO}]_d[\text{O}_2]_d \quad (3.36)$$

elde edilir. Buna göre (3.34) ifadesi yeniden düzenlenerek ;

$$\frac{d[\text{CO}]}{dt} = R_1 + R_2 - \frac{R_1 + R_2}{[\text{CO}]_d} [\text{CO}] \quad (3.37)$$

kısaltılmış eşitlik elde edilir. CO'in ve CO₂'te dönüşümünü en çok OH kökü kontrol ettiği için bu kökü oluşturan reaksiyonlardan biri de aşağıdaki reaksiyondur.



2000°K sıcaklığında bu reaksiyon ileri doğru oluşmaktadır. Sıcaklığın düşmesi halinde reaksiyon hız sabiti de düşer. Sıcaklığın artması ile OH oluşum hızı düşen diğer bir reaksiyon da aşağıdaki reaksiyondur.



Burada OH kökü, CO dönüşümünü kontrol etmektedir. OH kökü 1500°K'in altında hızlı bir şekilde azaldığında, yüksek sıcaklıkta oluşan CO düşük sıcaklık bölgesinde dönüşüm göstermemektedir. Sıcaklığın düşmesi ile (3.38) ve (3.39) reaksiyonları donmaktadır. Buna göre CO'ü CO₂'e dönüştüren (3.32) reaksiyonunun bir fonksiyonu kalmamaktadır.

3.1.5. Hidrokarbon emisyonları

İçten yanmalı motorlarda hidrokarbonların esas kaynağı yavaş veya kısmi yanma, zengin karışımlar, birikintiler, segman aralıkları, egzoz sistemindeki delikler, yağ tabakaları ve alevin soğuması veya sönmesidir. Bu kadar karmaşık sebeplere bağlı olan hidrokarbonların oluşum mekanizması matematik olarak tam modellenmiş değildir. Çünkü HC oluşumu tek bir mekanizmaya bağlı değildir. Alevin sönmesi ile başlar, egzoz kanalı sonuna kadar devam eder. Bunun için değişik mekanizma kullanılarak ayrı ayrı hesaplanması gerekir. Silindir cidarlarının soğuması ve stokiyometrik şartlara yakın durumlar yanmış hidrokarbonlar için büyük bir kaynak olmayabilir. Araştırmacıların çoğu hidrokarbonların esas kaynağının küçük kanal ve çizikler olduğunu ileri sürmüşlerdir [Boam, vd. 1993]. HC emisyonu daha ziyade yanmanın tam gerçekleşmediği yerlerde görülmektedir.

Silindir içindeki karışım, tutuşma şartlarına eriştiği an ile tutuşmanın başladığı süre içinde biriken HC emisyonları ölçmeye çalışılmıştır. Yakıt zerreciklerinin hava ile yaptığı çok zengin veya çok fakir kısımlarında HC emisyonunun arttığı görülmüştür [Boam, vd. 1991]. Yakıt zerreciklerinin silindir cidarında soğumaları da HC emisyonunun artmasına sebep olmaktadır. Bu da incelendiği zaman tutuşma başladıktan sonra enjeksiyon sistemi ve zamanlamasına bağlı olarak yaklaşık 6° krank açısında karışım en zengin değerine ulaşmaktadır. Bu durumda sıcaklık artışına bağlı olarak hızlanan yanma reaksiyonları ile fakir karışım bölgelerine ulaşılır. Bu bölgelerde hızlı reaksiyonlar biterek yavaş reaksiyonlar oluşur ve bunun sonucunda yanmamış HC emisyonları artmaya başlar. Egzoz sistemindeki oksijen konsantrasyonunun yeterli olduğu durumlarda HC emisyonlarının oksidasyonları sıcaklığın yeterli oluşu ile devam etmektedir. Gaz sıcaklığı, oksijen konsantrasyonu ve egzoz borusunda kalma süresindeki değişimlerden dolayı %70'e kadar HC emisyonu egzoz borularında reaksiyona girmektedir. Egzoz kanallarındaki HC oksidasyonu, silindir gaz sıcaklığı, egzoz kanalı cidar sıcaklığı, egzoz borusu uzunluğu ve kesit alanına bağlıdır.

Egzoz borusunda oluşan HC emisyonunun kontrol edilmesi için egzoz sistemi kontrol hacimlerine ayrılarak enerji ve kütle denklemleri yazılır [Eastop, vd. 1993].

$$mC_p \frac{dT}{dt} = m_g C_p (T_m - T_g) - m_{\dot{g}} C_p (T_g - T_{\dot{g}}) - Q_{\dot{g}} \quad (3.40)$$

$$m \frac{dT}{dt} = T_g (m_{\dot{g}} - m_g) \quad (3.41)$$

Burada m (kg) sözkonusu hacimdeki akışkanın kütlesi, T (°K) kütlenin sıcaklığı ve C_p (kJ/kg°K) özgül ısıdır. m_g (kg) giren egzozun kütlesi, $m_{\dot{g}}$ (kg) çıkan egzozun kütlesi ve $Q_{\dot{g}}$ (kJ) kontrol hacminden çıkan ısı miktarıdır. Kontrol hacmi için ideal gaz kanunu yazılırsa,

$$\frac{PV}{R} = m T = \text{sabit} \quad (3.42)$$

bağıntısı elde edilir ve bu bağıntının zamana göre türevi alınarak (3.41) ifadesine benzetilmeye çalışılır.

$$m \frac{dT}{dt} = T (m_g - m_s) \quad (3.43)$$

Egzoz borusundan kaybolan ısı miktarı kontrol hacmi gözönüne alınarak hesaplanabilir [Bejan,1993].

$$Q = h P (T - T_w) \quad (3.44)$$

Burada h ısı taşınım katsayısı, P kontrol bölgesinin çevre basıncı, T çevre sıcaklığı ve T_w de cidar sıcaklığıdır.

Egzoz borusundaki HC oksidasyonu aşağıdaki eşitlik ile hesaplanır [Ramos, 1989].

$$\frac{d[HC]}{dt} = C [HC][O_2]^{0.25} \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) \quad (3.45)$$

Burada C uygunluk katsayısı olup değeri $-1.36.10^6$, E aktivasyon enerjisi olarak bilinir ve $E = -31.000$ J/mol olarak alınır, T (°K) egzoz gazı sıcaklığı, R (J/mol °K) olarak gaz sabitidir. Bu değerler (3.45) ifadesinde yerine yazılırsa;

$$\frac{d[HC]}{dt} = -1.36.10^6 [HC][O_2]^{0.25} \exp\left(-\frac{31.000}{RT}\right) \quad (3.46)$$

Parantez içindeki değerler aşağıdaki reaksiyon ile ifade edilen konsantrasyonları gösterir.



Dizel motorlarda aynı zamanda silindirin içerisine püskürtülen yakıt miktarının artması ile HC'ların arttığı görülmüştür. Benzer şekilde püskürtme süresinin azalması ile de HC'lar artmaktadır. Motorun yanma odası cidarlarında alev azalması veya sönmesi meydana gelir. Soğuk cidarlardan dolayı alevin içinde aktif kökler üretilir. Alev söndüğü zaman aleve doğru yanmamış karışımın hacmi içinde HC'lar

bulunmaktadır. Bu hidrokarbonların alev sonrasında oksidasyonu söz konusu olmaktadır. Alev sonrası oluşan HC emisyonlarının belirlenmesi şu ifade yardımı ile olmaktadır.

$$\tau = A [\text{HC}]^n m_v \exp \left(-\frac{E}{RT} \right) \quad (3.47)$$

Burada, A eşitlikteki birimlerin dengelenmesi için bir katsayı olup değeri 1 olarak alınmaktadır. τ krank açısına bağlı olarak tutuşma gecikmesi zamanı, m_v (kg/cm³) silindir içinde buharlaşmış ve yanmaya hazır yakıt miktarı, E (J/mol) aktivasyon enerjisi, R(J/mol[°]K) gaz sabiti ve T (°K) silindir içindeki gazın sıcaklığıdır. n = 1 olarak alınmaktadır. (3.47) ifadesi [HC] emisyonunun değişimine göre yeniden düzenlenirse;

$$[\text{HC}] = A (\tau)^{-1} m_v \exp \left(-\frac{E}{RT} \right) \quad (3.48)$$

elde edilir.

Genişleme ve egzoz işlemleri boyunca oluşan HC'ların oksidasyonu, kısmen reaksiyona girmiş veya yanmamış olanlar ilk yanmada meydana gelmektedir. Genişleme sırasında veya alev sonrası oluşan HC emisyonlarının oksidasyon oranları bir çok farklı çalışmalarda ve bazı deneysel çalışmalar sonucu sınırlandırılmıştır. Buna göre genişlemede oluşan HC emisyonlarının hesaplanmasında aşağıdaki eşitlikten yararlanılmıştır [Heywood, 1988].

$$\frac{d[\text{HC}]}{dt} = -6,7 \cdot 10^{15} \exp \left(\frac{-18,735}{T} \right) \bar{x}_{\text{HC}} \bar{x}_{\text{O}_2} \left(\frac{P}{RT} \right) \quad (3.49)$$

[] parantezi bir cm³'teki mol sayısı yani mol/cm³ olarak mol konsantrasyonu, $\bar{x}_{\text{HC}}$ HC'nun mol fraksiyonu, $\bar{x}_{\text{O}_2}$ oksijenin mol fraksiyonu, t saniye olarak oksidasyon süresi, T (°K) silindir içerisindeki gazın sıcaklığı, R(J/mol °K) gaz sabiti, P (MPa) silindir içindeki gazın basıncıdır.

Zengin karışımlarda oksijen önem kazandığı için oksijenin mol fraksiyonu önemli bir rol oynar. Sıcaklığın etkisini de silindir cidarlarındaki HC emisyonlarında görmek mümkündür. Alevin sönmesi iki işlem basamağında meydana gelir. İlk basamak soğuk cidarlardaki kısa mesafelerde alevin sönmesidir. İkinci basamak sönmeden önce çok kısa zaman diliminde oluşan oksidasyon ve difüzyondur.

3.1.6. Partikül emisyonları

Dizel motorlarda partikül emisyonlarının matematik olarak ifade edilmesi oldukça karmaşık bir olaydır. Partiküllerin karışık kimyasal yapıları değişik işletme şartlarında ortaya çıkmaktadır. Bu partiküller soğuk havalarda beyaz, aşınmış motorlarda yağ zerreciklerinin oluşturduğu mavi duman, tam yükte ve düşük hava/yakıt oranlarında is ve karbon parçacıklarının oluşturduğu siyah duman olarak ortaya çıkar. Yine dumanla beraber çıkan sülfatlar, yağlama yağı ve yakıttan gelen parçacıklar da partikül emisyonunu artırır. Bunların dışında da yakıt atomizasyonu, ısı ve kütle transferi, partikülün oluşum ve oksidasyonu da problem çıkarmaktadır. Bunun yanında yanma odası biçimi, enjektör, piston ve segmanlar da bu hesabı zorlaştırmaktadır.

Dizel motorlarında karışımın oranı ile yakıtın cinsi ve kalitesi partikül oluşumunu etkilemektedir. Partikül oluşumu fakir ortamlarda bulunan yakıt molekülleri ısı parçalanarak hidrojenlerin kolayca oksitlenmesi ve karbonların da oksitlenmeden ortamdan çoğalması olarak tanımlanır. Hidrojenlerin ayrılarak karbonca zengin moleküllerle birleşerek bir araya toplanması ile partikül zerrecikleri oluşur. Is zerrecikler de denilen bu partiküller yeterli sıcaklık, yanması için oksijen ve zaman bulamayınca egzoz yolu ile çevreye atılırlar.

Dizel motorlarda partikül oluşumunu etkileyen bir çok önemli faktör bulunmaktadır. Bu faktörler yakıtın kimyasal bileşimi, enjeksiyon, yakıt/hava oranı ve taşıtın yükü ile ilgili faktörlerdir. Bu faktörlerden dolayı partiküllerin matematik olarak ifade edilmesi zor olduğu için bu problemin basitleştirilmesi ve yarı amprik formüllerin kullanılması ile ifade edilmesi uygundur [Heywood, 1988].

Dizel motorlarında partikül emisyonu iki safhada oluşur. İlk olarak çekirdekleşme başlar daha sonra partikülün oksitlenmesi meydana gelir. Partikül yoğunluğunun zamanla değişim oranı şu şekilde yazılabilir;

$$\frac{d[P]}{dt} = P_o - P_{ox} \quad (3.50)$$

Burada P_o partikül oluşum veya çekirdekleşme oranı, P_{ox} partikülün oksitlenme oranıdır. Partikül oluşumunda yakıtın buhar kütlesi ve silindir basıncı önemli rol oynar. Partikülün çekirdekleşme hızı şu ifade ile bulunur [Seebold, 1989].

$$\frac{d[P_o]}{dt} = A_1 m_b P^{0.5} \exp\left(-\frac{E_o}{RT}\right) \quad (3.51)$$

Benzer şekilde partikülün oksitlenme hızı da şu şekilde bulunur.

$$\frac{d[P_{ox}]}{dt} = A_2 m_{ox} X_{ox} P^{1.8} \exp\left(-\frac{E_{ox}}{RT}\right) \quad (3.52)$$

(3.51) ve (3.52) ifadeleri (3.50) ifadesinde yerine yazılır.

$$\frac{d[P]}{dt} = A_1 m_b P^{0.5} \exp\left(-\frac{E_o}{RT}\right) - A_2 m_{ox} X_{ox} P^{1.8} \exp\left(-\frac{E_{ox}}{RT}\right) \quad (3.53)$$

Burada A_1 ve A_2 sabit katsayılarıdır, m_b (kg) buharlaşmış yakıtın kütlesi, P (MPa) silindir içindeki gazın basıncı, m_{ox} (kg) oksitlenen partikülün kütlesi, X_{ox} oksijenin molar oranı, E_o ve E_{ox} (cal/mol) partikül oluşumu ve oksitlenmesi sırasında aktivasyon enerjisi, T (°K) silindir içindeki gazların sıcaklığıdır.

Yukarıdaki (3.52) ifadesinde partikülün oksitlenmesi için yararlanılmaktadır. Partikülün oluşumu değişik kaynaklardan yararlanılarak ve (3.53) denkleminin çözümünde aynı değerleri ifade eden birimler bir katsayı yardımı ile birleştirilmiş olup değişik bir sembolle ifade edilerek aşağıdaki denklem bulunur.

$$\frac{d[P]}{dt} = A_p m_{yb}^a m_{ox}^b (V_k X_y)^c P^d T^e \exp\left(-\frac{E_p}{RT}\right) \quad (3.54)$$

Burada A_p ifadeyi denkleştirmek için kullanılan bir katsayı, m_{yb} (kg) yakıt buharının kütlesi, m_{ox} (kg) oksijenin kütlesi, V_k (m³) karışımın hacmi, X_y yakıtın molar oranı, P (MPa) silindir basıncı, T (°K) silindir içindeki gazın sıcaklığı, E_p (cal/mol) partikül oluşumunun aktivasyon enerjisidir.

(3.54) ifadesindeki katsayılar, $a=1$, $b=1$, $c=0$, $d=-1$ ve $e=1$ olarak alınır [Belardini, vd. 1993] denklem aşağıdaki şekle gelir.

$$\frac{d[P]}{dt} = A_p m_{yb} m_{ox} P^{-1} T \exp\left(-\frac{E_p}{RT}\right) \quad (3.55)$$

Burada A_p katsayısı değişik literatürlerde yükleme durumuna göre değişik değerler (tam yük için 440, yarım yük için 40 ve çeyrek yük için 15) almaktadır. Katsayıdan da anlaşılacağı üzere tam yükte partikül oluşumu daha fazladır. Aynı zamanda partikül oluşumu için gerekli olan sıcaklık yaklaşık 800°C olarak bilinmektedir. Bu sıcaklığın üzerindeki durumlarda partikül oluşur aksi halde oksitlenme meydana gelir ki o zaman (3.53) ifadesi geçerli olacaktır.

4. MATERYAL ve METOD

4.1. Bitkisel Yağlar

Bitkisel yağlar, içten yanmalı motorlarda özellikle dizel motorlarında önemli bir yakıt kaynağı haline gelebilir. Bu yağların ısıtılması halinde viskozitesinde düşüş olabileceği için öncekinden daha rahat kullanılabilir. 63°C sıcaklık farkından bazı ham bitkisel yağların viskozitesi %20 oranında azalmaktadır [Altın, 1998]. Bunların dezavantajı düşük sıcaklıklarda performans etkisi göstermeyen gliserin içeriğine sahip olmalarıdır. Bu yağların düşük sülfür oranına sahip olmaları da önemli bir avantajdır. Bitkisel yağların kalitesi doymuşluk derecesi, iyodin sayısı ve asit değerine göre belirlenir. Doymuşluk derecesine göre bu yağlar üç gruba ayrılır.

1. Yüksek setan sayısı ve viskoziteye sahip doymuş yağlar.
2. Ortalama viskozite ile karakterize edilen yarı doymuş çift bağa sahip olan yağlar.
3. Düşük viskozite ve setan sayısına sahip olan en uzun karbon zincirli doymamış yağlar.

Ateşleme kabiliyetini etkileyen iyodin sayısı bitkisel yağlar için ortalama 10 ile 180 arasında değişir [Jankowski, vd. 1994]. Bitkisel yağların tamamında asit değeri önemli bir parametredir. Doymuş yağ asidi olarak adlandırılan bu yağ asidi, orta miktarda palmitik asit ve az miktarda da stearik asit içermektedir. Asit değeri enjektörlerde birikimlerin oluşması, ateşleme, ısıl denge ve korozyonu belirleyen önemli bir faktördür. Yağların asitlenmesi tohum çıkarımı, toplanması ve depolanması sırasında serbest yağ asitlerinin ortaya çıkması ile meydana gelir.

Bitkisel yağların motor yakıtı olarak kullanılmasını etkileyen kimyasal ve fiziksel özellikleri belirler. Bu yağların dizel motorlarında alternatif yakıt olarak kullanılması için, kaynama sıcaklığı, viskozite, yanma ısısı, setan sayısı ve ısıl değeri gibi parametreler büyük bir önem taşır. Kaynama sıcaklığı, enjeksiyondan sonra buharlaşması, ısıl çözünme için belirleyici bir özelliktir. Çok yüksek kaynama sıcaklığı,

4.2. Ayçiçek ve Pamuk Yağı

Bir dizel yakıtına alternatif olan ayçiçek yağının kimyasal bileşimi incelendiğinde bir çok yağ asidi çeşidine sahip olduğu görülmektedir. Bu yağ asidi değeri aşağıda verilmiştir.

<u>Bileşimi</u>	<u>Yapısı</u>	<u>% oranı</u>	<u>Formülü</u>
Palmitik	16	6	$\text{CH}_3-(\text{CH}_2)_{14}-\text{COOH}$
Stearik	18	5	$\text{CH}_3-(\text{CH}_2)_{16}-\text{COOH}$
Oleik	18:1	19	$\text{CH}_3-(\text{CH}_2)_7-\text{CH}=\text{CH}-(\text{CH}_2)_6-\text{COOH}$
Linoleik	18:2	69	$\text{CH}_3-(\text{CH}_2)_4-\text{CH}=\text{CH}-\text{CH}_2-\text{CH}=\text{CH}-(\text{CH}_2)_7-\text{COOH}$
Linolenik	18:3	1	$\text{CH}_3-(\text{CH}_2)_2=\text{CH}-\text{CH}_2-\text{CH}=\text{CH}-\text{CH}_2-\text{CH}=\text{CH}-(\text{CH}_2)_7-\text{COOH}$

<u>Bileşimi</u>	<u>Erime noktası</u>	<u>Formülü</u>
Palmitik	63.5°C	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{14} \text{ COOH}$
Stearik	73.1 °C	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{16} \text{ COOH}$
Oleik	5.5 °C	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_7 \text{ CH}=\text{CH} (\text{CH}_2)_6 \text{ COOH}$
Linoleik	-13.1 °C	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_4 \text{ CH}=\text{CHCH}_2\text{CH}=\text{CH}(\text{CH}_2)_7 \text{ COOH}$
Linolenik	-24.2 °C	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_2=\text{CHCH}_2\text{CH}=\text{CHCH}_2\text{CH}=\text{CH}(\text{CH}_2)_7 \text{ COOH}$

Bir dizel yakıtına alternatif olabilecek pamuk yağının kimyasal bileşimi incelendiğinde bir çok yağ asidi çeşidine sahip olduğu görülmektedir. Bu asitler pamuk bitkisinin yetiştirildiği bölgeye ve cinsine göre farklı değerler alabilmektedir. Bu yağ asidi değeri aşağıda verilmiştir [Yücel, 1999].

<u>Bileşimi</u>	<u>Yapısı</u>	<u>% oranı</u>	<u>Formülü</u>
Palmitik	16	22.9	$\text{CH}_3-(\text{CH}_2)_{14}-\text{COOH}$
Stearik	18	2.15	$\text{CH}_3-(\text{CH}_2)_{16}-\text{COOH}$
Oleik	18:1	24.7	$\text{CH}_3-(\text{CH}_2)_7-\text{CH}=\text{CH}-(\text{CH}_2)_6-\text{COOH}$
Linoleik	18:2	49.7	$\text{CH}_3-(\text{CH}_2)_4-\text{CH}=\text{CH}-\text{CH}_2-\text{CH}=\text{CH}-(\text{CH}_2)_7-\text{COOH}$
Miristik	14	0.55	$\text{CH}_3-(\text{CH}_2)_{12}-\text{COOH}$

Ticari kaynaklardan elde edilen ayçiçek ve pamuk yağının fiziksel ve kimyasal özellikleri aşağıdaki gibidir.

	<u>Ayçiçek Yağı</u>	<u>Pamuk Yağı</u>
Isıl değeri	: 36327 (kJ/kg)	36700 (kJ/kg)
Viskozite (38°C)	: 33,98 (mm ² /s)	34,89 (mm ² /s)
Alevlenme noktası	: 274 °C	300 °C
Asit değeri	: 0,1 (mg/g)	0,1 (mg/g)
İyodin değeri	: 130 (cg/g)	108 (cg/g)
Nem oranı	: 0.03	0,12

Yağ asidi dağılımı yukarıdaki tabloda verildiği gibidir. Dizel yakıtında 10 defa büyük olan viskozite ayçiçek yağı için bir dezavantajdır. Yüksek vizkoziteden dolayı iyi bir püskürtme sağlamak için kullanmadan önce dizel yakıtı ile seyreltilebilir ve ısıtma işlemine tabi tutulabilir. Bu işlemlerden başka değişik kimyasal yollarla viskozitesi düşürülebilir. Püskürtme sırasında parçalanmayı iyileştirmek için enjeksiyon basıncı artırılabilir.

4.3. Ayçiçek ve Pamuk Yağı Metil Esterinin Hazırlanması

İşlenmemiş yani rafine edilmemiş ayçiçek ve pamuk yağından üç defa daha küçük olan moleküler ağırlıklı ester, yağ için en önemli bir değişimdir. Fosfolipidlerinden dolayı rafine edilmemiş ayçiçek ve pamuk yağında esterleştirme yapmak mümkündür ve bu yolla serbest yağ asitleri uzaklaştırılır. Serbest yağ asitleri, bir asidik katalistin varlığındaki metanolün geniş bir şekilde çıkışı ile tamamen ısıtılarak esterleştirilir. Eğer su mevcut ise reaksiyonun tamamlanması önlenir. Esterleşme reaksiyonu tamamlanmazsa bazı mono ve trigliseridler oluşabilir.

Metanoldeki konsantre edilmiş sülfirik asidin hacim olarak % 1 – 2 arasındaki karışımı metanolik hidrojen klorid olarak daha çok aynı oranda ve aynı tarzda lipidleri direkt olarak esterleştirir. Serbest yağ asitlerinin esterleşmesi için geriye dönüş sıcaklığı altında bir soğutucu akım kullanılır. Eğer soğutucu akım dikkatsiz kullanılırsa poli doymamış yağ asitlerinin az miktarda çözünmesi ile karşılaşılabilir.

Metanolun içindeki bor triflorid, serbest yağ asitlerini esterleştiren hızlı bir nicelik olarak direkt esterleştirmede kullanılır. Belirteç soğutulurken sınırlandırılmış bir basamağa sahip olduğu için daha çok konsantre edilmiş dokuda suni olarak meydana getirilen üretimle sonuçlanır. Ayrıca polidoymamış yağ asidinin çok az miktarının kaybı da söz konusudur. Metanoldeki bor triklorid, lipidlerin aşırı esterleşmesini sağladığı için daha fazla kullanılmaz. Bor triflorid metanolun içinde kullanılınca istenmeyen yan reaksiyonlar görülmez.

Kolesterol esterleri veya trigliseroller gibi polar olmayan lipidler metanolun ön baskısında birleşen kısımlardan çözülmez ve etkili çözüm için çözücü ilave edilmedikçe uygun zamanda reaksiyon vermez. Benzen büyük toksit olduğundan toluen veya tetrahidroforan gibi bazı çözücüler kullanılabilir. %5'lik metanolik hidrojen klorid veya %1'lik H_2SO_4 esterleştirmeye en etkili olan bir çözücüdür. %1'lik H_2SO_4 ihtiva eden metanol serbest yağ asitlerini çok hızlı bir şekilde metilleştirir. Diğer lipidleri etkili olarak aşırı esterleştirme için kullanılır.

Yağ esterleri elde etmede kullanılan kimyasal maddeler aşağıdaki gibidir.

Adı	Kapalı formülü	Kütlesel ağırlığı	Yoğunluğu	Kaynama nok.
Toluen	C_7H_8	91,140 gr/mol	0,87 gr/ml	111°C
Metanol	CH_3OH	32,042 gr/mol	0,79 gr/ml	65°C
n-Hegzan	C_6H_{14}	86,160 gr/mol	0,66 gr/ml	69°C
Sülfürik asit	H_2SO	498,078 gr/mol	1,84 gr/ml	-
Sodyum klorür	$NaCl$	58,442 gr/mol	-	-
Potasyum bikarbonat	$KHCO_3$	100,115 gr/mol	-	-
Sodyum sülfat	Na_2SO_4	142,040 gr/mol	-	-

4.4. Ayçiçek ve Pamuk Yağından Ester Elde Edilmesi

Dizel motorlarının egzoz emisyonları ile ilgili yapılan bu çalışmada kullanılan bikisel yağlardan ayçiçek ve pamuk yağı metil esterlerinin kirletici emisyonları incelenmiştir. Buna göre dizel yakıtı ile ayçiçek ve pamuk çekirdeği yağlarının metil esterlerinin belli oranlarda dizel yakıtı ile karıştırılarak ikisi arasındaki yakınlık

incelenmiş ve dizel yakıtı yerine ayçiçek ve pamuk çekirdeği yağı metil esterinin kullanımı amaçlanmıştır. Çalışmanın bundan sonraki bölümü genel olarak üç temel kısımdan oluşmuştur.

1. Ayçiçek ve pamuk yağının yoğunluk ve vizkozitesinin düşürülmesi için, bu yağların metil esterleri elde edilmiş ve metil ester ile dizel yakıtının emisyon kirleticileri karşılaştırılmıştır.

2. Dizel yakıtı ve alternatif yakıt hacimsel olarak %50 oranında karıştırılmış ve deneysel olarak incelenmiştir.

3. Motor tam gaz ve değişik devirlerde çalıştırılmış ve sözkonusu yakıtlar karşılaştırılarak ve saf olarak avantaj ve dezavantajları göz önüne serilmiştir.

Fırat Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Kimya Bölümü laboratuvarında kurulan deney düzeneğinde ham ayçiçeği yağından metil ester elde edilmiştir. Deneyde kullanılan kimyasal maddeler hacimsel olarak karıştırılmıştır. Bu çalışmada kullanılan ayçiçek ve pamuk yağı metil esteri aşağıdaki şekilde basamak basamak hazırlanmıştır [Christie, 1989].

1. Ayçiçek ve pamuk yağı örneğinin hacimsel olarak 2 litresi için 1 litre toluen (C_7H_8) alınarak bir yoğunlaştırucu ile uygun gelen bir deney kabının içinde çözülmüştür.
2. Çözülen nümune yuvarlak dipli rodajlı bir balona aktarılarak üzerine ham yağın 2 litresi için 2 litre %1'lik sülfirik asit (H_2SO_4) ihtiva eden metanol (CH_3OH) ilave edilerek üst tarafına bir soğutucu takılmıştır. Esterin asidik özelliğini gidermek için sülfirik asit kullanılmıştır.
3. Hazırlanan bu düzenek $50^{\circ}C$ 'lik su veya yağ banyosunda yaklaşık 12 saate kadar ısıtılarak bekletilir. Bu araştırmada hazırlanan karışım 12 saat süreyle $50^{\circ}C$ 'lik yağ banyosundan bekletilmiştir.

4. 50°C'lik yağ banyosundan 12 saat bekletilen karışımın üzerine yağın iki litresine karşılık 5 litre olacak şekilde %5'lik NaCl eriyiği ilave edilip iyice karıştırılmıştır.
5. Karışım, ayırma kaplarına alınarak üzerine 2 litre yağ için 5 litre olacak şekilde n-hegzan (C_6H_{14}) ilave edilmiş ve iyice karıştırılmıştır. Daha sonra fazların ayrılması için bir süre bekletilmiştir.
6. Alt faz bir başka ayırma kabına alınarak, üst faz yerinde bırakılmıştır. Alt faz tekrar yukarıda bahsedilen miktar kadar hegzanla yıkanmış, bir süre beklemeden sonra fazlar ayrılarak alt faz uzaklaştırılmıştır. Üst fazların tamamı bir kapta birleştirilmiştir. Alt fazlar üzerinde herhangi bir işlem yapılmadan atılmıştır.
7. Üst fazlar birleştirildikten sonra yağın hacmi kadar %2'lik potasyum bikarbonat ($KHCO_3$) çözeltisi ilave edildikten sonra iyice karıştırılmış ve fazların ayrılmasına veya dinlenmeye terkedilmiştir. Yağ asitlerinin korozyon etkilerini gidermek için potasyum bikarbonat sulu çözeltisi kullanılmıştır. Dinlenmeye bırakılan esterde bulunan asit ve diğer maddeler kabın dibine çökmüştür.
8. Fazlar ayrıldıktan sonra alt faz ayırma hunisi yardımı ile atılır. Daha sonra elde edilen esterin motorda daha iyi yanması için sudan temizlenmesi amacı ile üsteki ester fazına susuz sodyum sülfat (Na_2SO_4) ilave edilerek iyice karıştırılmış ve suyu alınmıştır yani kurutulmuştur.
9. Elde edilen metil ester karışımı süzgeç kağıdından süzülerek sodyum sülfattan temizlenmiş, ayçiçek ve pamuk yağı saf metil esteri elde edilmiştir.

Elde edilen ayçiçek ve pamuk yağı metil esterlerinin kapalı formülleri gaz kromatografisi analizinden sonra yaklaşık olarak bulunmuştur. Buna göre ayçiçek yağı

metil esteri $C_{56}H_{94}O_6$ ve pamuk yağı metil esteri de $C_{55}H_{104}O_6$ olarak belirlenmiştir.

4.5. Deney Yakıtlarının Kimyasal ve Fiziksel Özellikleri

Deneysel olarak kullanılan yakıtların fiziksel ve kimyasal özellikleri laboratuvar çalışmaları sonucu aşağıdaki şekilde bulunmuştur.

Deney yakıtı	Yoğunluk (kg/lt)	Isıl değer (kj/kg)	Vizkozite (mm ² /sn) (26°C)
Dizel yakıtı	0.84 0	42902	3.20
50PE50D	0.860	41808	3.75
50AE50D	0.865	41070	3.85
100PE	0.880	40763	4.30
100AE	0.890	39342	4.50

4.6. Deneyde Kullanılan Cihazlar

4.6.1. Dinamometre

4750 d/d'ya kadar 24.1 Nm sabit tork veren bir alanda dönen doğru akım makinasıdır. Motor miline bağlı olan bir çark vasıtasıyla dönen dinamometrenin yüklenmesi bir voltaj dönüştürücüsü ile sağlanmaktadır. Elde edilen kuvvet, dinamometrenin merkezinden 0.25 m mesafede çalışan istenildiğinde kalibre yapılabilen yük hücreleri yardımı ile ölçülür. Ölçülen bu kuvvet moment olarak hesaplanır ve moment de güce dönüştürülür. Bu güç motorun milinden alınan güç olup mil gücü veya fren gücü olarak adlandırılır.

4.6.2. Hava tüketimi ölçüm sistemi

Motorun hava tüketimi, test yatağı ile beraber bulunan hava debisi ölçüm cihazı ile belirlenmektedir. Bu cihaz aynı sisteme bağlı olup bir sönümleme odası, hava miktarının belirlenmesinde kullanılan nozul ve hava ölçümü kısmı 0... 90 mmSS aralığında ölçüm imkanı bulunan bir eğik menometreden oluşmaktadır. Hava, sönümleme odasından geniş açılı bir nozuldaki geçerek elastik bir bağlantı hortumu ile motora verilir. Motora emilen hava nozuldaki geçtikten sonra debisinin belirlenmesi için hassas bir eğik manometre kullanılmaktadır. Nozul üst akım ve alt akım bölgeleri arasındaki sıvı yüksekliği olarak basınç farkı ile kütleli debi arasındaki ilişki için enerji denklemi, süreklilik denklemi ve bernoulli denkleminde yararlanılarak havanın hacimsel debisi (Q) aşağıdaki ifade verilmiştir [Cussons tech., 1994].

$$Q = 0.2087 C Z_D Z_R \epsilon E d^2 (h/\rho_H)^{0.5} \quad (\text{lt/saat}) \quad (4.1)$$

d : Nozul çapı (mm)

ρ_H : Nozulun önündeki hava yoğunluğu (kg/m^3)

h : Manometrede okunan fark basınç (mmSS)

Z_R : Reynold sayısı düzeltme faktörü

C : Nozul katsayısı

Z_D : Boru boyut düzeltme faktörü

ϵ : Genişleme faktörü

E : Hız düzeltme faktörü

Deney yapılan test yatağına göre $C = 0.60$, $Z_D = 1.003$, $E = 1.0145$ ve barometrik basınç $P = 0.9799$ (bar), hava sıcaklığı $T = 300^\circ\text{K}$ ile $R = 287 \text{ J/kg}^\circ\text{K}$ değerleri için $\rho_H = 1.1049$ (kg/m^3) bulundu. Buna göre Z_R ve ϵ ihmal edilip nozul çapı $d = 21$ mm ve diğer değerler (4.1) eşitliğinde yerine konulursa hacimsel hava debisi

$$Q = 3.32 (h)^{0.5} \quad (\text{m}^3/\text{saat}) \quad (4.2)$$

olarak bulunur.

4.6.3. Yakıt tüketiminin ölçülmesi

Deneyde yakıt tüketiminin belirlenmesi için bir terazi ve kronometre kullanılmıştır. Motor kararlı hale geldikten sonra bir dakikalık bir süre içinde harcanan yakıt miktarı tartı sonucu bulunmuştur. Elde edilen değerle yakıtın akış debisi hesaplanmış ve aşağıdaki bağıntıya göre özgül yakıt tüketimi bulunmuştur.

$$be = \frac{Be}{Pe} 1000 \quad (\text{g/kWh}) \quad (4.3)$$

Burada, Be (kg/h) yakıtın akış debisi, P (kW) motorda elde edilen güçtür.

4.6.4. Gaz analiz cihazı

Egzoz gazının analizi için, egzoz emisyonları ve dumanı sayısı değerlerinin tespitinde, MRU marka portatif dijital göstergeli bir cihaz kullanılmıştır. Bu gaz analiz cihazı ile aşağıdaki emisyon ürünlerini ölçmek mümkündür.

Ortam sıcaklığı	°C
Egzoz gazı sıcaklığı	°C
O ₂	%
CO ₂	%
CO	ppm ve mg/Nm ³
SO ₂	ppm ve mg/Nm ³
NO _x	ppm
NO ₂	ppm
Yanma verimi	%
λ	(-)
Duman sayısı	0.....9

4.6.5. Kronometre

Deney sürelerinin ölçülmesi ve yakıt tüketiminin tespit edilmesi için Robic marka dijital bir kronometre kullanılmıştır.

4.6.6. Deneyde kullanılan yakıtlar

Deneyde ticari dizel yakıtı, Karadeniz Birlik Ayçiçeği Yağ fabrikasında alınan ham yağdan elde edilen metil ester ve Diyarbakır Çukobirlik Yağ Fabrikasından elde edilen pamuk çiğdi yağından elde edilen metil ester ile bu esterlerin dizel yakıtının %50 hacimsel karışımları ve saf olarak esterler kullanılmıştır. Karışımlar elde edildikten sonra uzun süre bekletilmiş ve herhangi bir ayrışma olmamıştır.

4.6.7. Deneyde kullanılan motorun teknik özellikleri

Deneylerde kullanılan motorun teknik özellikleri aşağıda yazılı olduğu gibidir.

Marka ve modeli	: Lombardini, 6LD400
Çalışma Prensibi	: 4 zamanlı, direkt enjeksiyonlu
İlk hareket	: el ile
Silindir adedi	: 1
Silindir çapı	: 86 mm
Strok	: 68 mm
Silindir hacmi	: 395 cm ³
Sıkıştırma oranı	: 18:1
Soğutma	: hava ile
Maksimum tork	: 2200 d/d'da 20 Nm
Yakıt deposu kapasitesi	: 4,3 lt.
Yağ kapasitesi	: 1,2 lt
Minimum yağ basıncı	: 1 – 1,5 kg/cm ²

Boy	: 382 mm
En	: 427 mm.
Yükseklik	: 491 mm.
Ağırlık	: 45 kg.
Enjektör püskürtme basıncı	: 200 bar

4.7. Deney Seti

Deneyler, bir test yatağı ve yukarıda teknik özellikleri belirtilen bir dizel motorundan oluşan bir deney düzeneğinden meydana gelmiştir. Bu düzenek F.Ü. Teknik Eğitim Fakültesi Otomotiv Anabilim Dalı laboratuvarında bulunmaktadır

4.7.1. Deneyin yapılışı

Motor önce çalıştırılıp ısındıktan sonra deney verilerini almak için gerekli ayarlamalar yapılmıştır. Ham pamuk ve ayçiçek yağından elde edilen esterlerinin motor performansı ve egzoz emisyonlarına etkilerini belirlemek amacıyla motor tam gaz - değişik devir testine tabi tutulmuştur. Deney önce yakıt enjeksiyon pompası ile enjektörün orijinal basınç değerinde yapılmıştır. Motor sıcaklığı 60°C'ye ulaştıktan sonra başlanmış ve 90°C'ye kadar ısınmasına müsaade edilmiştir. Daha yüksek derecelere çıkmaması için soğutma tedbirleri alınmıştır. Standart enjeksiyon basıncında deneyler tamamlandıktan sonra enjeksiyon basıncı 150, 175, 225 ve 250 bar'a değiştirilerek deneylere devam edilmiştir. Deneyler arasında motor devamlı dinlenmeye bırakılmıştır. Motorun ısınması ve deney verilerinin alınması süresince hep aynı cins yakıt kullanılmıştır. Emisyon ürünlerinin tespiti için gaz analiz cihazı numune alma probu egzoz borusundaki yerine motor kararlı hale geldikten sonra yerleştirilmiş ve göstergedeki rakamlar arasındaki değişimler en aza indikten sonra çıktı alınmıştır. Duman sayısı ölçmede filtre kağıdı kullanılmış olup kağıda bulaşan kurum şablon (bakarak) ile karşılaştırılmıştır.

5. DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Bu bölümde deney motorunda tam gaz - değişik motor devirleri ile değişik enjeksiyon basınçlarında dizel yakıtı, ayçiçek ve pamuk yağı metil esterleri ile %50 oranlarındaki karışımları kullanılmıştır. Beş adet değişik yakıt olarak değerlendirilebilecek yakıtlar aşağıdaki oranlarda hacimsel olarak karıştırılmıştır.

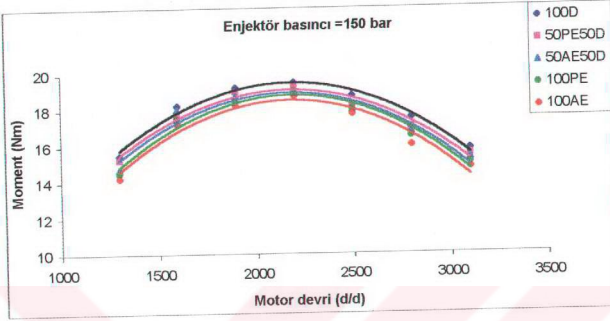
1. %100 Dizel yakıtı (100D)
2. %50 Dizel yakıtı + %50 Pamuk yağı metil esteri (50PE50D)
3. %50 Dizel yakıtı + %50 Ayçiçek yağı metil esteri (50AE50D)
4. %100 Pamuk yağı metil esteri (100PE)
5. %100 Ayçiçek yağı metil esteri (100AE)

Bu oranlardaki karışımların kullanılması ile elde edilen motor performansı olarak, piston hızı, hava giriş basıncı, hava sıcaklığı, hava/yakıt oranı, sıkıştırma oranı gibi parametrelerde motorun değişik çalışma şartları altında elde edilen güç ile verimler gibi motor performansı hakkında bilgi verebilecek değerleri ile egzoz emisyon ürünlerinin değişimleri grafik şekline dönüştürülerek değerlendirilmiştir.

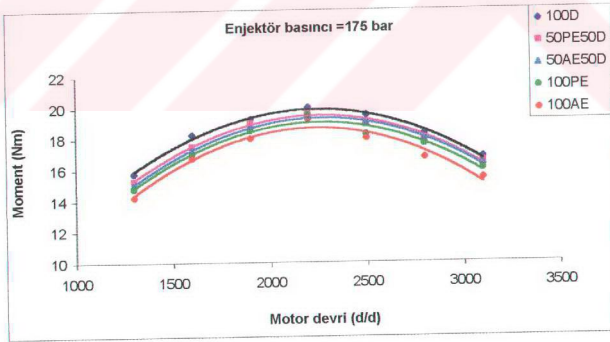
5.1. Moment Değişimi

Bütün motor yakıtları ile yapılan testlerde, farklı enjeksiyon basınçlarında motor momentinin motor devri ile değişimi Şekil 5.1, 5.2, 5.3, 5.4 ve 5.5'te görülmektedir. Maksimum motor momenti bütün enjeksiyon basınçlarında 2200 d/d'da meydana gelmiştir. Dizel yakıtı ve alternatif yakıt olarak kullanılan ayçiçek yağı metil esteri ile pamuk yağı metil esteri saf ve %50 oranlarında hacimsel olarak dizel yakıtı ile karışımı kullanılarak motor devrine bağlı moment değişim eğrileri şeklinde gösterilmiştir. İlk değerler, motor enjeksiyon basıncı standart durumda iken yani 200 bar püskürtme basıncında alınmıştır. Dizel yakıtı ile diğer ester karışımları ve saf esterle yapılan deneylerde maksimum motor momenti 2200 d/d motor hızında elde edilmiştir.

Deneylere seçilen en küçük enjektör basıncından başlanmış ve enjektör basıncı kademeli artırılarak deneyler tamamlanmıştır



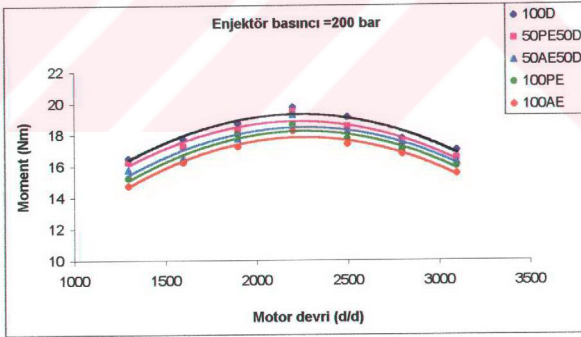
Şekil. 5. 1. Değişik devirlerde tam gaz ve 150 bar enjeksiyon basıncında 100D, 50PE50D, 50AE50D, 100PE ve 100AE yakıtlarının moment değişimleri.



Şekil 5. 2. Değişik devirlerde tam gaz ve 175 bar enjeksiyon basıncında 100D, 50PE50D, 50AE50D, 100PE ve 100AE yakıtlarının moment değişimleri.

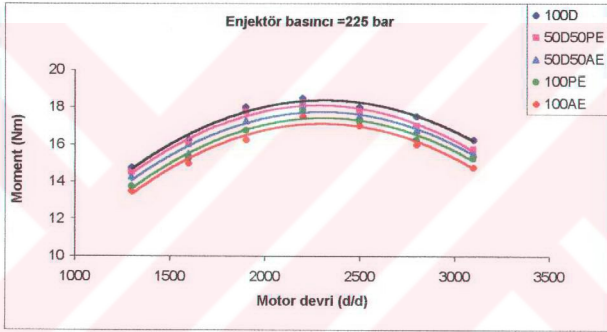
Şekil 5.1'de dizel yakıtı, 50PE50D, 50AE50D, 100PE ve 100AE yakıtları ile yapılan deneylerde maksimum moment değeri motorun 2200 d/d'lık hızında gerçekleşmiştir. Dizel yakıtı için bu değer 19.50 Nm iken 50PE50D yakıtı %2'lik bir artış ile 19.75 Nm, 50AE50D yakıtı ile %3'lük bir azalma ile 19.00 Nm olmuştur. 100PE yakıtında %3'lük bir düşüş ile 19.00 Nm ve 100AE yakıtı %6'lık bir düşüş göstererek 18.50 Nm olmuştur. Literatürde, bitkisel yağların metil esterleri ile yapılan çalışmalarda da yaklaşık aynı düşüşler mevcuttur.

Şekil 5.2'de dizel yakıtı, 50PE50D, 50AE50D, 100PE ve 100AE yakıtları ile 175 bar enjeksiyon basıncında yapılan deneylerde maksimum moment değeri 2200 d/d motor hızında gerçekleşmiştir. Dizel yakıtı için bu değer 19.75 Nm iken 50PE50D yakıtı %2'lik bir azalma ile 19.50 Nm ve 50AE50D yakıtı için %4'lük bir düşüş ile bu değer 19.00 Nm olmuştur. 100PE yakıtı için %4'lük bir düşüş ile 19.00 Nm ve 100AE yakıtı için %7'lük bir düşüş ile 18.50 Nm olmuştur. Altın'ın (1998) yapmış olduğu bir çalışmada ayçiçek yağı metil esteri dizel yakıtına karşı %6'lık bir düşüş göstermiştir.



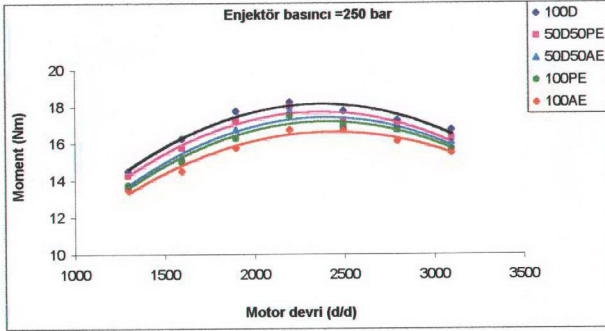
Şekil 5. 3. Değişik devirlerde tam gaz ve 200 bar enjeksiyon basıncında 100D, 50PE50D, 50AE50D, 100PE ve 100AE yakıtlarının moment değişimleri.

Şekil 5.3. incelendiği vakit her beş yakıt için de maksimum moment değerleri 2200 d/d'da meydana gelmiştir. Dizel yakıtı ile 20.00 Nm'lik moment elde edilirken 50PE50D yakıtı ile %2'lik bir düşüşle 19.75 Nm olmuştur. 50AE50D yakıtında %3'lük bir düşüş ile 19.50 Nm, 100PE yakıtı %3'lük bir azalma ile 19.50 Nm ve 100AE yakıtı da %7'lik bir düşüşle 18.75 Nm olmuştur. Diğer devirlerde moment değerleri incelendiği vakit yaklaşık aynı oranlar gerçekleşmektedir. Motorun standart basıncı olan bu basınçta dizel yakıtı ile 100PE yakıtı ve karışımları ile birbirlerine yakın moment değerleri elde edilmektedir.



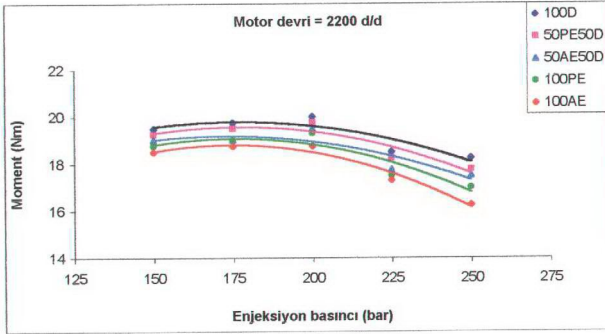
Şekil 5. 4. Değişik devirlerde tam gaz ve 225 bar enjeksiyon basıncında 100D, 50PE50D, 50AE50D, 100PE ve 100AE yakıtlarının moment değişimleri.

Şekil 5.4 'de dizel yakıtı ile 50PE50D, 50AE50D, 100PE ve 100AE yakıtları ile 225 bar enjeksiyon basıncında yapılan çalışmada maksimum moment değeri 2200 d/d'lık motor hızında meydana gelmiştir. Dizel yakıtı için bu değer 18.50 Nm iken 50PE50D yakıtı için %2'lik bir düşüş ile 18.25 Nm, 50AE50D yakıtı için %4'lük düşüş ile 17.75 Nm, 100PE için %6'lık bir düşüşle 17.50 Nm ve 100AE ile %9'luk bir düşüş ile 17.00 Nm olmuştur. Motor devrinin yükselmesi ile 100PE ve 100AE yakıtları dizel yakıtına karşı iyi bir performans göstermemiştir.



Şekil 5. 5. Değişik devirlerde tam gaz ve 250 bar enjeksiyon basıncında 100D, 50PE50D, 50AE50D, 100PE ve 100AE yakıtlarının moment değişimleri.

Şekil 5.5'te dizel yakıtı, 50PE50D, 50AE50D, 100PE ve 100D yakıtları ile 250 bar enjeksiyon basıncında yapılan çalışmada maksimum moment değeri 2200 d/d'lık motor hızında gerçekleşmiştir. Dizel yakıtı için bu değer 18.25 Nm iken 50PE50D yakıtı için %2'lik bir düşüş ile 18.00 Nm olmuştur. 50AE50D yakıtı için %4'lük bir düşüşle 17.50 Nm, 100PE yakıtı için %6'lık bir düşüşle 17.25 Nm ve 100AE yakıtı için de %9'luk bir düşüşle 16.50 Nm olduğu görülmektedir. Buna göre yüksek enjeksiyon basınçlarında dizel yakıtı ve ester karışımları dizel yakıtına yakın moment değeri vermektedir. Saf haldeki esterlerin moment değerleri biraz daha düşüktür.



Şekil 5. 6. Sabit devir, tam gaz ve değişik enjeksiyon basınçlarında 100D, 50PE50D, 50AE50D, 100PE ve 100AE yakıtlarının moment değişimleri.

Şekil 5.6'da görüldüğü gibi 150 bar enjeksiyon basıncı ve 2200 d/d motor hızında 100D yakıtı ile 19.50 Nm'lik moment elde edilmiştir. 175 bar enjeksiyon basıncında %2'lik bir artışla 19.75 Nm, 200 bar enjeksiyon basıncında %3'lük bir artışla 20.00 Nm, 225 bar enjeksiyon basıncında %6'lık azalma ile 18.50 Nm ve 250 bar enjeksiyon basıncında %7'lik bir azalma ile 18.25 Nm'lik moment elde edilmiştir. Dizel yakıtı ile en yüksek moment değeri motorun standart enjeksiyon basıncı olan 200 bar basınçta elde edilmiştir.

150 bar enjeksiyon basıncı ve 2200 d/d motor hızında 50PE50D yakıtı ile 19.25 Nm, 175 bar basınçta %2'lik bir artışla 19.50 Nm, 200 bar basınçta %3'lük bir artışla 19.75 Nm, 225 bar basınçta %5'lik azalma ile 18.25 Nm ve 250 bar basınçta %7'lik bir azalma ile 18.00 Nm'lik moment elde edilmiştir. 150 bar enjeksiyon basıncı ve 2200 d/d motor hızında 50AE50D yakıtı ile 19.00 Nm, aynı devir ve 175 bar basınçta %2'lik bir artışla 19.25 Nm, 200 bar basınçta %3'lük bir artışla 19.50 Nm, 225 bar basınçta %7'lik bir azalma ile 17.75 Nm ve 250 bar enjeksiyon basıncında %8'lik bir azalma ile 17.50 Nm'lik moment elde edilmiştir.

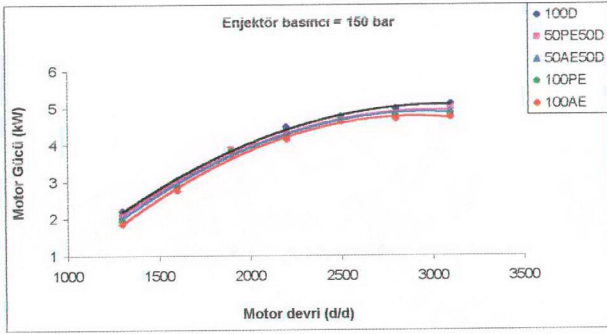
150 bar enjeksiyon basıncı ve 2200 d/d motor hızında 100PE yakıtı ile 18.75 Nm, 175 bar basınçta %2'lik artışla 19.00 Nm, 200 bar basınçta %5'lik bir artışla 19.25 Nm, 225 bar basınçta %8'lik azalma ile 17.25 Nm ve 250 bar basınçta %10'luk bir

azalma ile 17.00 Nm'lik moment elde edilmiştir. 150 bar enjeksiyon basıncı ve 2200 d/d motor hızında 100AE yakıtı ile 18.50 Nm, 175 bar basınçta %2'lik artışla 18.75 Nm, 200 bar basınçta %2'lik bir azalma ile 18.25 Nm, 225 bar basınçta %11'lik azalma ile 16.50 Nm ve 250 bar basınçta % %13'lük bir azalma ile 16.25 Nm'lik moment elde edilmiştir. Dizel yakıtı, 50PE50D, 50AE50D ve 100PE yakıtları ile 200 bar ve 100AE yakıtı ile 175 bar enjeksiyon basıncında en yüksek moment değeri elde edilmiştir.

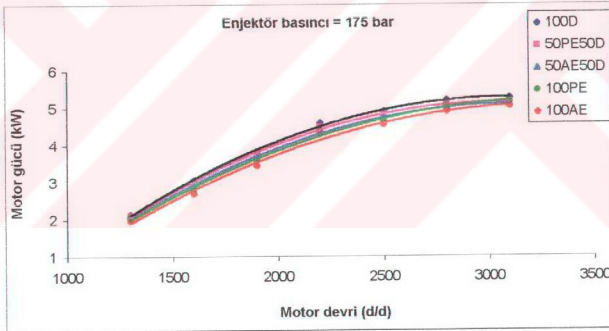
Enjeksiyon basıncının artması halinde dizel yakıtında, esterlere nazaran düşük vizkoziteli olduğu için iyi bir atomizasyon sağlanmıştır. Esterlerin vizkoziteleri ve yoğunlukları dizel yakıtına göre yüksek oldukları için düşük enjeksiyon basıncında daha iyi bir atomizasyon sağlanmaktadır. Yüksek enjeksiyon basınçlarına doğru dizel yakıtındaki moment düşüşü esterlere oranla daha azdır. Aynı zamanda esterlerin karbon bağları daha fazladır. Yakıt hüzmelerinin püskürtme esnasında yanma odasının cidarlarına çarpmaması için, enjektör memesinin delik çapı ve dolayısıyla enjektör basıncının uygun olması gerekir. Aksi halde yakıt hüzmelerinin yanma odası yüzeylerinde birikmesi sonucu yanma yavaşlar ve eksik yanma meydana gelir. Bunun için de motorda moment ve dolayısıyla güç düşüşü olmaktadır. Dizel yakıtının en büyük moment düşüşü 250 bar enjeksiyon basıncında olmaktadır. En düşük moment ise 100AE yakıtı ile 175 bar enjeksiyon basıncının dışındaki basınçlarda meydana gelmiştir. Karışımlarda da enjeksiyon basıncının yükselmesi ile bir moment düşüşü gözlenmektedir.

5.2. Motor Gücü

Deney motorunda yukarıda belirtilen yakıtlarla belli oranlarda dizel yakıtı ile ester karışımında elde edilen moment verilerine göre motor gücü, moment–devir bağıntısından hesaplanmıştır. Buna göre motor gücü düşük devirlerden yüksek devirlere doğru yükselmiş ve bir maksimumdan geçtikten sonra tekrar düşmüştür. Bütün yakıtlar ile yapılan testlerde farklı enjeksiyon basınçlarında motor gücünün motor devri ile değişimi eğriler şeklinde gösterilmiştir. Maksimum motor gücü bütün enjeksiyon basınçlarında 3100 d/d'lık motor hızında meydana gelmiştir.



Şekil 5. 7. Değişik devirlerde tam gaz ve 150 bar enjeksiyon basıncında 100D, 50PE50D, 50AE50D, 100PE ve 100AE yakıtlarının güç değişimleri.

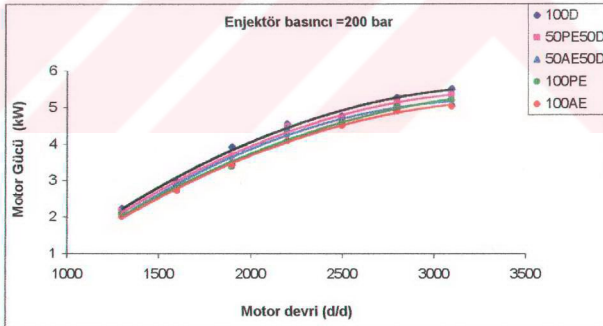


Şekil 5. 8. Değişik devirlerde tam gaz ve 175 bar enjeksiyon basıncında 100D, 50PE50D, 50AE50D, 100PE ve 100AE yakıtlarının güç değişimleri.

Şekil 5.7’de dizel yakıtı, 50PE50D, 50AE50D, 100PE ve 100AE yakıtları ile 150 bar enjeksiyon basıncında yapılan deneylerde maksimum güç 3100 d/d motor hızında elde edilen güç eğrileri görülmektedir. Bu devirde dizel yakıtı için 5.11 kW

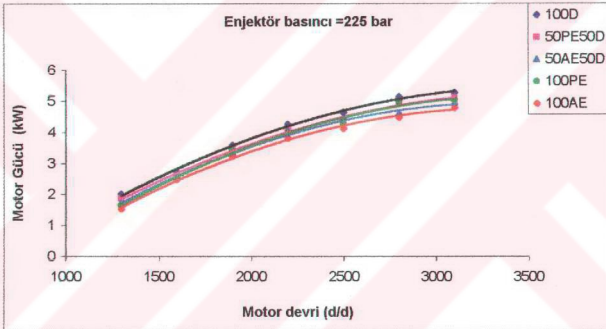
güce karşılık 50PE50D yakıtı ile %2'lik düşüşle 5.03 kW, 50AE50D yakıtı ile %3'lük bir düşüşle 4.95 kW, 100PE yakıtı ile %3'lük bir düşüşle 4.95 kW ve 100AE yakıtı ile %5'lik bir artışla 4.86 kW güç elde edilmiştir. Buna göre sözkonusu enjeksiyon basıncında deney motoru ile dizel yakıtına oranla diğer yakıtlardan da yakın güç değerleri elde edilmiştir. Maksimum momentin elde edildiği devir olan 2200 d/d'da dizel yakıtı için 4.49 kW, 50PE50D için 4.43 kW, 50AE50D için 4.37 kW, 100PE için 4.31 kW ve 100AE yakıtı için de 4.26 kW'lık güç elde edilmiştir.

Şekil 5.8'de dizel yakıtı ile 50PE50D, 50AE50D, 100PE ve 100AE yakıtı ile 175 enjeksiyon basıncında yapılan deneylerde elde edilen güç eğrileri görülmektedir. Bütün yakıtlar için maksimum güç, motorun 3100 d/d'lık hızında elde edilmiştir. Bu devirde dizel yakıtı için 5.27 kW ve 50PE50D yakıtı ile %2'lik bir düşüşle 5.19 kW'lık güç elde edilmiştir. 50AE50D yakıtı ile dizel yakıtına oranla %2'lik bir düşüşle 5.19 kW, 100PE yakıtı ile %4'lük bir azalma ile 5.11 kW ve 100AE yakıtı ile %5'lik düşüşle 5.03 kW'lık güç elde edilmiştir. Maksimum momentin elde edildiği devir olan 2200 d/d'da dizel yakıtı için 4.55 kW, 50PE50D için 4.49 kW, 50AE50D için 4.43 kW, 100PE için 4.37 kW ve 100AE yakıtı için de 4.31 kW'lık güç elde edilmiştir



Şekil 5. 9. Değişik devirlerde tam gaz ve 200 bar enjeksiyon basıncında 100D, 50PE50D, 50AE50D, 100PE ve 100AE yakıtlarının güç değişimleri.

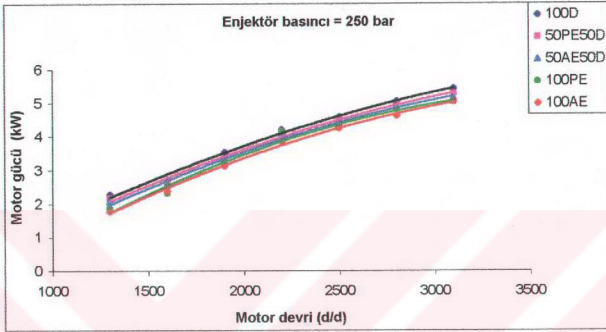
Şekil 5.9'da dizel yakıtı ve 50PE50D, 50AE50D, 100PE ve 100AE yakıtları ile 200 bar enjektör açılma basıncında yapılan çalışmada maksimum güç değeri 3100 d/d'lık motor hızında elde edilmiştir. Motorun standart enjeksiyon basıncı olan bu basınçta 3100 d/d'da 5.51 kW güç dizel yakıtı ile elde edilmiştir. Aynı devirde 50PE50D yakıtı ile %3'lük bir düşüşle 5.35 kW, 50AE50D ile %5'lik düşüşle 5.27 kW, 100PE yakıtı ile %6'lık bir azalma ile 5.19 kW ve 100AE yakıtı ile %9'luk bir düşüşle 5.03 kW güç elde edilmiştir. Maksimum momenti veren devirde dizel yakıtı ile pamuk yağı metil esteri ile yakın değerde güç elde edilmiştir. Jankowski ve arkadaşlarının (1994) bitkisel yağların metil esteri ile yaptıkları bir çalışmada metil ester ile dizel yakıtı birbirine yakın performans değerleri vermiştir.



Şekil 5. 10. Değişik devirlerde tam gaz ve 225 bar enjeksiyon basıncında 100D, 50PE50D, 50AE50D, 100PE ve 100AE yakıtlarının güç değişimleri.

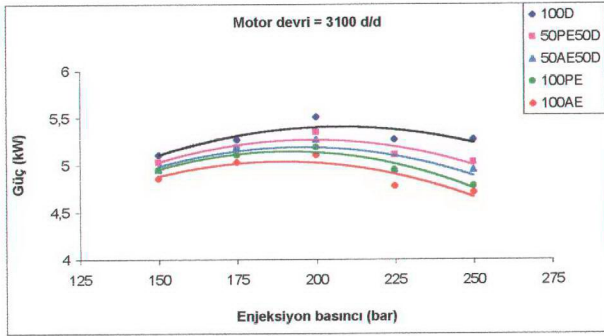
Şekil 5.10'da 225 bar enjeksiyon basıncında dizel yakıtı ile 100D, 50PE50D, 50AE50D, 100PE ve 100AE yakıtlarının güç değişimleri incelendiğinde maksimum motor gücünün elde edildiği devirde dizel yakıtı ile 5.27 kW güç elde edilmiştir. 50PE50D yakıtı ile %3'lük bir düşüşle 5.11 kW, 50AE50D yakıtı ile %6'lık bir düşüşle 4.95 kW, 100PE yakıtı ile %6'lık bir düşüşle 4.95 kW ve 100AE yakıtı ile %10'luk bir düşüşle 4.78 kW güç elde edilmiştir. Maksimum momentin elde edildiği devirdeki güç,

dizel yakıtı için 4.26 kW, 50PE50D yakıtı için 4.20 kW, 50AE50D yakıtı için 4.00 kW pamuk yağı metil esteri için 3.97 kW ve ayçiçek yağı metil esteri için de 3.80 kW olarak bulunmuştur. Burada düşük devirlerde 100PE yakıtı dizel yakıtı ile yakın performans göstermiştir. Buradaki durum literatürde yapılan çalışmalar ile uygunluk içindedir.



Şekil 5. 11. Değişik devirlerde tam gaz ve 250 bar enjeksiyon basıncında 100D, 50PE50D, 50AE50D, 100PE ve 100AE yakıtlarının güç değişimleri.

Şekil 5.11’de dizel yakıtı, 50PE50D, 50AE50D, 100PE ve 100AE yakıtları ile 250 bar enjeksiyon basıncında yapılan deneylerde dizel yakıtı için elde edilen 5.27 kW’lık güce karşılık 50PE50D yakıtı ile elde edilen güç %5’lik bir azalma ile 5.03 kW, 50AE50D yakıtı ile elde edilen güç %6’lık bir azalma ile 4.95 kW, 100PE yakıtı için elde edilen güç %10’luk bir azalma ile 4.78 kW ve 100AE yakıtı ile elde edilen güç %11’lik bir azalma ile 4.71 kW olarak hesaplanmıştır. Dizel yakıtı ile pamuk yağı metil esteri arasındaki güç düşüşü %10, ayçiçek yağı metil esteri arasındaki düşüş ise %11’dir. 250 bar enjeksiyon basıncındaki çalışmada esterlerin dizel yakıtı ile karışımları dizel yakıtına yakın güç değerleri vermiştir. Düşük motor devirlerinde de karışımlar iyi performans değerleri vermiştir.



Şekil 5.12. Sabit devir, tam gaz ve değişik enjeksiyon basınçlarında 100D, 50PE50D, 50AE50D, 100PE ve 100AE yakıtlarının güç değişimleri.

Şekil 5.12. ve Şekil E1.2. incelendiği vakit 150 bar enjeksiyon basıncı ve maksimum motor gücünün elde edildiği devir olan 3100 d/d'da dizel yakıtı ile 5.11 kW, 175 bar enjeksiyon basıncında %3'lük bir artışla 5.27 kW, 200 bar enjeksiyon basıncında %8'lik bir artışla 5.51 kW, 225 bar basınçta %5'lik bir artışla 5.35 kW ve 250 bar enjeksiyon basıncında %3'lük bir artışla 5.27 kW'lık güç elde edilmiştir.

150 bar enjeksiyon basıncı ve 3100 d/d motor hızında 50PE50D yakıtı ile 5.03 kW, 175 bar enjeksiyon basıncında %3'lük bir artışla 5.19 kW, 200 bar enjeksiyon basıncında %6'lık bir artışla 5.35 kW, 225 bar basınçta %2'lik bir artışla 5.11 kW ve 250 bar enjeksiyon basıncında 5.03 kW'lık güç elde edilmiştir. 150 bar enjeksiyon basıncı ve 3100 d/d motor hızında 50AE50D ile 4.95 kW, 175 bar enjeksiyon basıncında %5'lük bir artışla 5.19 kW, 200 bar enjeksiyon basıncında %6'lık bir artışla 5.27 kW, 225 bar basınçta 4.95 kW ve 250 bar enjeksiyon basıncında 4.95 kW'lık güç elde edilmiştir.

150 bar enjeksiyon basıncı ve maksimum motor gücünün elde edildiği devir olan 3100 d/d'da 100PE yakıtı ile 4.95 kW, 175 bar enjeksiyon basıncında %3'lük bir artışla 5.11 kW, 200 bar enjeksiyon basıncında %5'lik bir artışla 5.19 kW, 225 bar basınçta 4.95 kW ve 250 bar enjeksiyon basıncında %4'lük bir azalma ile 4.78 kW'lık güç elde edilmiştir. 150 bar enjeksiyon basıncı ve 3100 d/d motor hızında 100AE yakıtı ile 4.86 kW, 175 bar enjeksiyon basıncında %4'lük bir artışla 5.03 kW, 200 bar

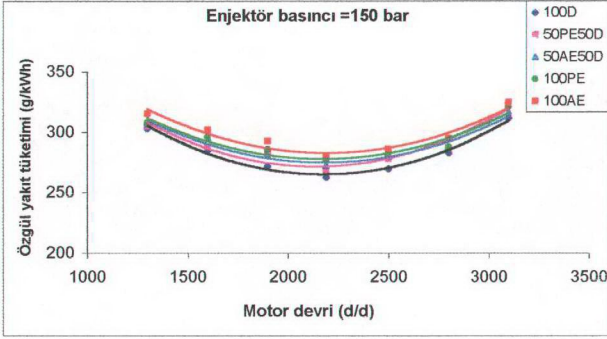
enjeksiyon basıncında %5'lik bir artışla 5.11 kW, 225 bar basınçta %2'lik bir azalma ile 4.78 kW ve 250 bar enjeksiyon basıncında %3'lük bir azalma ile 4.71 kW'lık güç elde edilmiştir.

Şekil 5.12. incelendiğinde dizel yakıtı ve esterler ile maksimum güç 200 bar enjeksiyon basıncında elde edildiği görülmektedir. Buradan da 100D yakıtı 200 bar yani motorun standart enjeksiyon basıncında iyi bir yanma verdiği ve esterler ile karışımlarda da düşük enjeksiyon basınçlarında iyi yandıkları görülmektedir.

Enjeksiyon basıncının değişimi ile atomizasyon önemli ölçüde etkilenmektedir. Aynı zamanda atomizasyonun gecikme periyodu üzerinde oldukça büyük bir önemi vardır. İyi bir atomizasyon, küçük boyuttaki yakıt zerreleri gecikme periyodunu kısaltır. Yakıt zerreciklerinin mümkün olduğu kadar küçük olması ve homojen bir dağılmanın sağlanması enjektör memesinin görevidir. Çok iyi ve ince bir atomizasyonla gecikme periyodu 0.0008 saniyeye kadar indirilebilir ve kaba bir atomizasyonla bu zaman 0.005 saniye olabilir. Çok iyi bir yanma sağlayabilmek için püskürtülen zerrelere %20'sinin çapı 0.005 mm'den, %30'unun çapı 0.015 mm'den ve gerisinin de 0.06 mm'den büyük olması gerekmektedir. Buna göre dizel yakıtının atomizasyonu enjeksiyon basıncının artması ile iyileşmekte ve iyi bir yanma sağlanmaktadır. Diğer taraftan enjeksiyon basıncının artmasıyla enjektörün açılmasına harcanan enerji miktarı da artacaktır, dolayısıyla motor gücünde bir miktar azalma olacaktır. Yukarıdaki şartların dizel yakıtı için 200 bar enjeksiyon basıncı ve sonrası, esterler için de 150, 175 ve 200 bar enjeksiyon basınçlarında elde edilmiştir. Esterler 200 bar enjeksiyon basıncından sonra güç düşüşü göstermiştir.

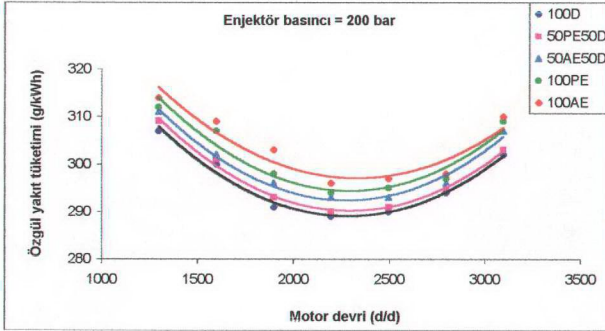
5.3. Özgül Yakıt Tüketimi

Motorun önemli performans parametrelerinden biri olan özgül yakıt tüketimi, birim güç başına tüketilen yakıt miktarı olarak tanımlanmaktadır. Özgül yakıt tüketimini tespit etmek için hassas bir terazi ve kronometre kullanılmıştır. Bir dakika süre için harcanan yakıt miktarı bulunmuş ve daha sonra kg/h değerine çevrilerek bir saatlik süre içerisinde tüketilen yakıt miktarı hesaplanmıştır. Aynı devirde harcanan özgül yakıt tüketimi güç – yakıt tüketimi ilişkisi yardımıyla hesaplanmıştır.



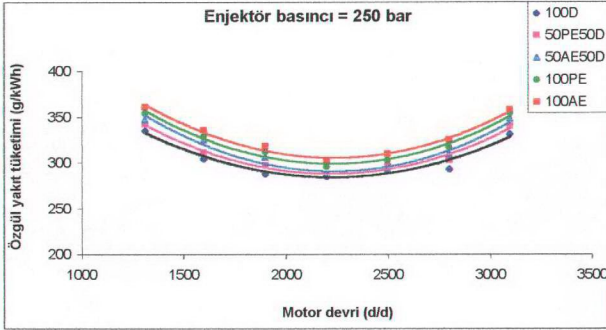
Şekil 5. 13. Değişik devirlerde tam gaz ve 150 bar enjeksiyon basıncında 100D, 50PE50D, 50AE50D, 100PE ve 100AE yakıtlarının özgül yakıt tüketimi.

150 bar enjeksiyon basıncında minimum özgül yakıt tüketimi maksimum momentin elde edildiği 2200 d/d'da elde edilmiştir. Maksimum motor momentinin olduğu 2200 d/d'da özgül yakıt tüketimi dizel yakıtı ile 263 g/kWh, 50PE50D yakıtı ile 273 g/kWh, 50AE50D yakıtı ile 281 g/kWh, 100PE yakıtı ile 287 g/kWh ve 100AE yakıtı ile 288 g/kWh olarak bulunmuştur. Maksimum gücün elde edildiği 3100 d/d'da 100D için 312 g/kWh, 50PE50D yakıtı ile 318 g/kWh, 50AE50D yakıtı ile 331 g/kWh, 100PE yakıtı ile 347 g/kWh ve 100AE yakıtı ile 345 g/kWh yakıt tüketimi hesaplanmıştır. Esterlerin kullanımında özgül yakıt tüketiminde bir miktar artış görülmektedir. Fakat bu artış çok fazla değildir.



Şekil 5. 14. Değişik devirlerde tam gaz ve 200 bar enjeksiyon basıncında 100D, 50PE50D, 50AE50D, 100PE ve 100AE yakıtlarının özgül yakıt tüketimi.

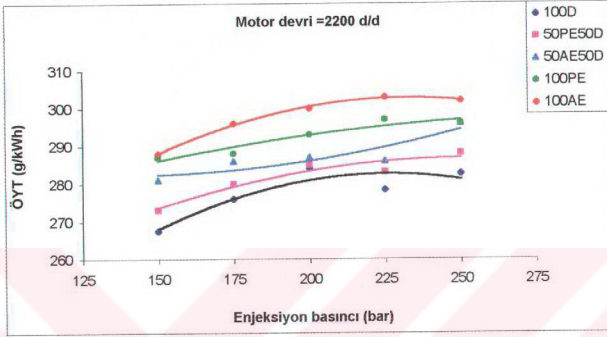
Şekil 5.14. incelendiği vakit 200 bar enjeksiyon basıncında maksimum moment devri olan 2200 d/d'da özgül yakıt tüketimi dizel yakıtı ile 284 g/kWh, 50PE50D yakıtı ile 285 g/kWh, 50AE50D yakıtı ile 287 g/kWh, 100PE yakıtı ile 293 g/kWh ve 100AE yakıtı ile 306 g/kWh olarak bulunmuştur. Maksimum gücün elde edildiği 3100 d/d'da 100D için 302 g/kWh, 50PE50D yakıtı ile 315 g/kWh, 50AE50D yakıtı ile 306 g/kWh, 100PE yakıtı ile 329 g/kWh ve 100AE yakıtı ile 334 g/kWh yakıt tüketimi hesaplanmıştır. Esterlerin saf kullanımı halinde özgül yakıt tüketimleri dizel yakıtına oranla fazla olduğu görülmektedir. Bunun sebebi de yakıtların yoğunlukları ve ısıl değerleri ile ilgilidir. Birim hacimde püskürtülen yakıtın viskozitesi ile yoğunluğunun yüksek oluşu ve aynı zamanda alt ısıl değerinin de düşük olmasından dolayı özgül yakıt tüketimi daha fazla olmaktadır.



Şekil 5. 15. Değişik devirlerde tam gaz ve 250 bar enjeksiyon basıncında 100D, 50PE50D, 50AE50D, 100PE ve 100AE yakıtlarının özgül yakıt tüketimi.

Şekil 5.15. incelendiği vakit 250 bar enjeksiyon basıncında maksimum moment devri olan 2200 d/d'da özgül yakıt tüketimi dizel yakıtı ile 285 g/kWh, 50PE50D yakıtı ile 288 g/kWh, 50AE50D yakıtı ile 296 g/kWh, 100PE yakıtı ile 296 g/kWh ve 100AE yakıtı ile 302 g/kWh olarak bulunmuştur. Maksimum gücün elde edildiği 3100 d/d'da 100D için 305 g/kWh, 50PE50D yakıtı ile 320 g/kWh, 50AE50D yakıtı ile 325 g/kWh, 100PE yakıtı ile 341 g/kWh ve 100AE yakıtı ile 350 g/kWh yakıt tüketimi hesaplanmıştır. Buradan da esterlerin saf kullanılması halinde dizel yakıtına göre özgül yakıt tüketimi daha fazla olduğu görülmektedir. Yakıtların yoğunlukları ile ısı değerinin özgül yakıt tüketimine etkisinin ne derece büyük olduğu görülmüştür. Belli bir gaz kolu konumunda bütün yakıtlar aynı hacimde enjektörde püskürtülür. Yoğunluğu yüksek olan yakıt ağırlık olarak ta daha fazla miktarda silindire püskürtülür. Çünkü birim hacim başına düşen ağırlık daha fazla ve buna karşılık ısı miktarı daha azdır. Viskozite ile yoğunluğun dizel yakıtına göre daha yüksek oluşu ve aynı zamanda yakıtın alt ısı değerinin de düşük olması, aynı gücü elde etmek için daha fazla yakıtın harcanmasını gerektirmektedir ve dolayısıyla da özgül yakıt tüketimi daha fazla olmaktadır. Yakıtın püskürtülmesinde atomizasyonun çok önemli olduğu ve bunun da yanmayı etkilediği bilinmektedir. Motorun standart enjeksiyon basıncı olan 200 bar

basıncında özgül yakıt tüketiminin 250 bar enjeksiyon basıncındaki özgül yakıt tüketimine oranla daha az olduğunu göstermiştir. Fakat enjeksiyon basıncının standart basıncın altına düşmesi esterler için yanmanın daha iyileştiğini ve dizel yakıtına yakın güç elde edildiğini göstermiştir.

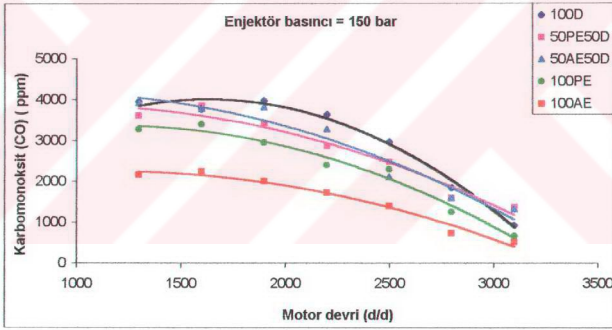


Şekil 5.16. Sabit devir, tam gaz ve değişik enjeksiyon basınçlarında 100D, 50PE50D, 50AE50D, 100PE ve 100AE yakıtlarının özgül yakıt tüketimi değişimleri.

Şekil 5.16. ve Şekil E1.3'te görüldüğü gibi maksimum momentin elde edildiği 2200 d/d motor devrinde bütün yakıtlar için enjeksiyon basıncının artması ile özgül yakıt tüketimi de artmaktadır. Enjeksiyon basıncının artması ile birlikte yakıt spreyinin hızı artmakta ve taneciklerin çapı da küçülmektedir. Küçülen taneciklerin nüfuz mesafeleri daha kısadır. Buna göre enjektör basıncının artırılması ile yakıtın hava içerisinde homojen bir karışım oluşturması sağlanamaz. Enjeksiyon basıncının azalması ile yakıt spreyinin çekirdek çapının büyümesine sebep olur ve havanın bu bölgeye nüfuziyeti azalır. Bundan dolayı damlacıkların çapı büyümekte ve spreyin silindir içindeki nüfuz derinliği de artar. Esterlerin standart basıncının altında daha çok dizel yakıtına yakın moment ve güç değeri vermesi de bundan kaynaklanmaktadır. Bunun için aynı gücü elde etmek için harcanan yakıtın miktarı, vizkozite ve yoğunluğuna göre değişir. Özgül yakıt tüketimi incelendiği vakit, 100D yakıtının en düşük, karışımların ondan sonra ve esterlerin de en yüksek oldukları görülmektedir. Bunun da yakıtların yoğunluğu ve ısı değeri ile yakından ilgili olduğu yukarıda açıklanmıştır.

5.4. Karbonmonoksit (CO) Emisyonu

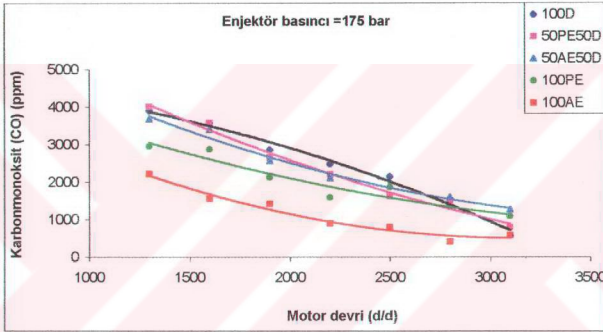
Karbonmonoksit (CO), silindir içine alınan yakıtın yanma kalitesini göstermektedir. Karbonmonoksit yakıtın tam yanmaması ve yakıttaki hidrokarbonların yanması sonucu ortaya çıkmaktadır. Bu emisyon ürünü silindir içerisindeki hava ile yakıtın oranına bağlı olarak değişmektedir. Yeteri kadar hava olmayınca CO miktarı artar ve yeterli hava miktarına ulaşınca CO, CO_2 'e dönüşür. Karbonmonoksit-motor devri ilişkisinden görüldüğü gibi CO miktarı her beş yakıt için de motor hızının artması ile birlikte azalma eğilimi göstermektedir. CO'ı CO_2 'e dönüştüren OH kökü 1500°K 'nin altında azaldığında, düşük devirlerde sıcaklık düşük olduğu için (3.35) ve (3.37) ifadelerine göre karbonmonoksit oranı yükselmektedir. Yüksek devirlere doğru egzoz gazı sıcaklığı da yükseldiği için (3.36) ve (3.37) denklemlerine göre CO miktarı düşmektedir. Motor devrinin düşmesi ve yüklemenin artması ile birlikte yanmanın kalitesi düşmekte ve CO miktarı da yükselmektedir.



Şekil 5. 17. Değişik devirlerde tam gaz ve 150 bar enjeksiyon basıncında 100D, 50PE50D, 50AE50D, 100PE ve 100AE yakıtlarının CO değişimleri.

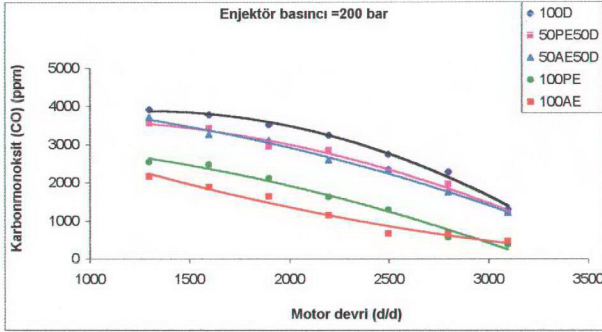
Şekil 5.17'de CO emisyonlarının devir sayısına bağlı olarak değişimi görülmektedir. CO emisyonları direkt yanma ile ilgili olduğu için, hava yakıt oranının küçük olduğu değerlerde CO'nin CO_2 'e dönüşüm hızı düşmekte ve CO emisyonları da azalmaktadır. Hava yakıt oranının yüksek değerlerinde dönüşüm daha hızlı olmakta ve

CO emisyonu düşmektedir. Deney motorunun devir ayarı yüklemle ile gerçekleştiği için, devrin düşük olduğu durumlarda CO oranı da yükselmektedir. Maksimum gücün elde edildiği devir olan 3100 d/d'da dizel yakıtı için CO miktarı 930 ppm, 50PE50D için 1366 ppm, 50AE50D için 1324 ppm, 100PE için 667 ppm ve 100AE için de 519 ppm olarak gerçekleşmiştir. Esterlerin saf olarak kullanımı 150 bar enjeksiyon basıncı için deney motorunda iyi bir yanma ve performans göstermiştir. Maksimum moment devrinde 100D için 3634 ppm, 50PE50D için 2860 ppm, 50AE50D için 3270 ppm, 100PE için 2395 ppm ve 100AE yakıtı için de 1121 ppm CO emisyonu gerçekleşmiştir. Buna göre saf esterler iyi bir yanma özelliği göstermiştir.



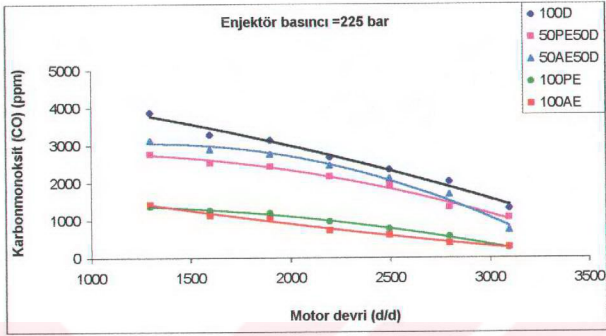
Şekil 5.18. Değişik devirlerde tam gaz ve 175 bar enjeksiyon basıncında 100D, 50PE50D, 50AE50D, 100PE ve 100AE yakıtlarının CO değişimleri.

Şekil 5.18. incelendiği zaman bütün yakıtlardaki CO miktarı motorun yüksek devirlerine doğru bir düşme göstermektedir. Yine düşük devirlerde yük artışı için yanma gittikçe kötüleşmektedir. Maksimum güç devri olan 3100 d/d'da dizel yakıtı için CO miktarı 576 ppm, 50PE50D için 835 ppm, 50AE50D için 1272 ppm, 100PE için 1094 ppm ve 100AE için de 580 ppm olarak gerçekleşmiştir. Maksimum moment devrinde 100D için 2489 ppm, 50PE50D için 2199 ppm, 50AE50D için 2123 ppm, 100PE için 1590 ppm ve 100AE yakıtı için de 898 ppm CO emisyonu gerçekleşmiştir. Buna göre saf esterler 175 bar enjeksiyon basıncı ile iyi bir yanma özelliğinden sonra dizel yakıtına yakın güç ve moment vererek iyi bir performans göstermiştir.

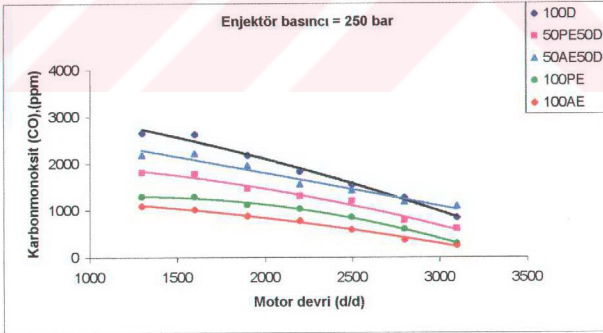


Şekil 5. 19. Değişik devirlerde tam gaz ve 200 bar enjeksiyon basıncında 100D, 50PE50D, 50AE50D, 100PE ve 100AE yakıtlarının CO değişimleri.

Şekil 5.19'da görüldüğü gibi bütün yakıtların 200 bar standart enjeksiyon basıncı ile yanmasından meydana gelen CO miktarı motorun yüksek devirlerine doğru bir düşme göstermektedir. Yine düşük devirlerde yük artışı için yanma gittikçe kötüleşmekte ve buna bağlı olarak CO emisyonları da yükselmektedir. Maksimum güç devri olan 3100 d/d'da dizel yakıtı için CO miktarı 1292 ppm, 50PE50D için 1213 ppm, 50AE50D için 1217 ppm, 100PE için 374 ppm ve 100AE için de 456 ppm olarak gerçekleşmiştir. Buna göre saf dizel yakıtı ile karışımlar birbirlerine yakın CO emisyonu ve güç verirken saf 100AE yakıtı düşük CO emisyonu ile düşük güç vermiştir. Maksimum moment devrinde 100D için 3244 ppm, 50PE50D için 2842 ppm, 50AE50D için 2581 ppm, 100PE için 1623 ppm ve 100AE yakıtı için de 1142 ppm CO emisyonu gerçekleşmiştir.



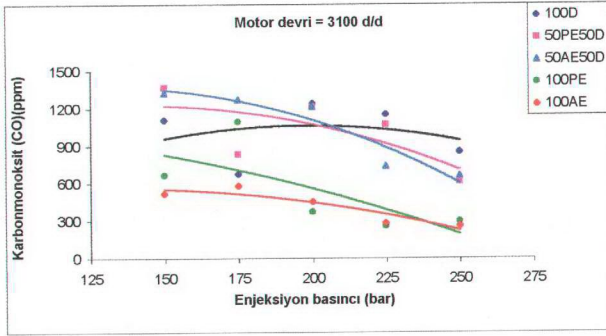
Şekil 5. 20. Değişik devirlerde tam gaz ve 225 bar enjeksiyon basıncında 100D, 50PE50D, 50AE50D, 100PE ve 100AE yakıtlarının CO değişimleri.



Şekil 5. 21. Değişik devirlerde tam gaz ve 250 bar enjeksiyon basıncında 100D, 50PE50D, 50AE50D, 100PE ve 100AE yakıtlarının CO değişimleri.

Şekil 5.20. incelendiği zaman bütün yakıtlardaki CO miktarı motorun yüksek devirlerine doğru bir düşme göstermektedir. Yine düşük devirlerde yük artışı için yanma gittikçe kötüleşmektedir. Maksimum gücün elde edildiği devir olan 3100 d/d'da dizel yakıtı için CO miktarı 1313 ppm, 50PE50D için 1069 ppm, 50AE50D için 739 ppm, 100PE için 256 ppm ve 100AE için de 279 ppm olarak gerçekleşmiştir. Maksimum moment devrinde 100D için 2687 ppm, 50PE50D için 2173 ppm, 50AE50D için 2453 ppm, 100PE için 961 ppm ve 100AE yakıtı için de 729 ppm CO emisyonu gerçekleşmiştir. CO emisyonunun oluşumunda hava fazlalık katsayısının önemi büyüktür. Hava fazlalık katsayısı dizel motorlar için 2'ye yaklaştığı vakit CO miktarı düşer. Düşük sıcaklıklarda CO'nin CO₂'e dönüşümü azalmaktadır. Bunun tersi durumlarda yani yüksek sıcaklıklarda CO₂ oluşum reaksiyonları hızlanır ve CO oluşumu azalır.

Şekil 5.21. incelendiği zaman bütün yakıtlardaki CO miktarı motorun yüksek devirlerine doğru bir düşme göstermektedir. Yine düşük devirlerde yük artışı için yanma gittikçe kötüleşmektedir. Maksimum gücün elde edildiği devir olan 3100 d/d'da dizel yakıtı için CO miktarı 850 ppm, 50PE50D için 610 ppm, 50AE50D için 659 ppm, 100PE için 293 ppm ve 100AE için de 259 ppm olarak gerçekleşmiştir. Maksimum moment devrinde 100D için 1830 ppm, 50PE50D için 1310 ppm, 50AE50D için 1562 ppm, 100PE için 1120 ppm ve 100AE yakıtı için de 780 ppm CO emisyonu gerçekleşmiştir.



Şekil 5. 22. Sabit devir, tam gaz. ve değişik enjeksiyon basınçlarında 100D, 50PE50D, 50AE50D, 100PE ve 100AE yakıtlarının karbonmonoksit (CO) değişimleri.

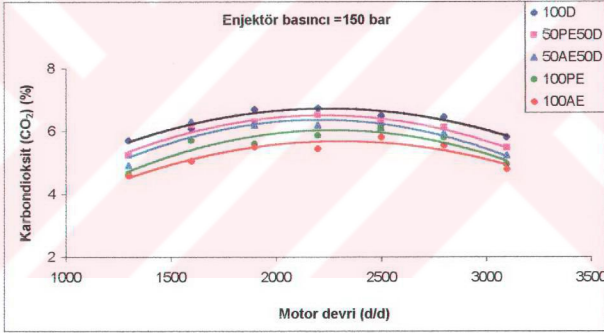
Şekil 5.22. ve Şekil E1.4'te görüldüğü gibi CO emisyonları, enjeksiyon basıncının artması ile düşmektedir. Dizel yakıtı için en yüksek CO emisyonu enjektörün standart basıncı olan 200 bar enjeksiyon basıncında oluşmaktadır. Esterler de en düşük CO oranı, en yüksek enjeksiyon basıncında görülmektedir. 150 bar enjeksiyon basıncında dizel yakıtı için 930 ppm, karışımlar için 1366 ppm ve 1324 ppm, 100PE için 667 ppm ve 100AE için de 519 ppm karbonmonoksit oluşmuştur. 175 bar enjeksiyon basıncında dizel yakıtı için 1272 ppm, karışımlar için 800 ppm ve 1272 ppm, 100PE için 1094 ppm ve 100AE için de 580 ppm karbonmonoksit ortaya çıkmıştır. 200 bar enjeksiyon basıncında dizel yakıtı için 1299 ppm, karışımlar için 1200 ppm ve 1213 ppm, 100PE için 374 ppm ve 100AE için de 456 ppm karbonmonoksit oluşmuştur. 225 enjeksiyon basıncında dizel yakıtı için 1313 ppm, karışımlar için 1069 ppm ve 739 ppm, 100PE için 256 ppm ve 100AE için de 279 ppm karbonmonoksit meydana gelmiştir. 250 bar enjeksiyon basıncında dizel yakıtı için 850 ppm, karışımlar için 610 ppm ve 1089 ppm, 100PE için 293 ppm ve 100AE için de 259 ppm karbonmonoksit oluşmuştur. CO emisyonu hava/yakıt oranına bağlı olarak değişmektedir. Yanma başladıktan sonra CO konsantrasyonu önce yükselir daha sonra genişleme ile beraber önemli bir kısmı CO₂'e dönüşür.

Dizel motorlarında silindire giren hava her çevrimde aynıdır, yalnızca motor devri arttığında sürtünme kayıplarından dolayı silindire giren havanın kütlesi bir miktar

azalır. Yüksek enjeksiyon basınçlarında hava ile yakıtın daha iyi karışması sonucu iyi bir yanma sağlanmaktadır.

5. 5. Karbondioksit (CO₂) Emisyonları

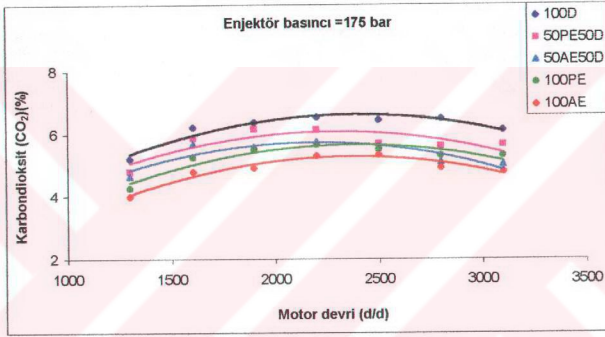
Karbondioksit emisyonlarının motor hızına göre değişimi değişik enjektör basınçlarında şekil 5.23, 5.24, 5.25, 5.26 ve 5.27’de verilmektedir. Karbondioksit değerinin motor hızına göre değişimi beş yakıt için grafik olarak verilmiştir. Her yakıt için elde edilen sonuçlar normal değerler içinde olup hızın artış ve azalışına göre değişimi Jankowski (1994) ve arkadaşlarının yapmış oldukları bitkisel yağı metil esteri deneylerinin davranışına uygun olduğu görülmektedir. Buna göre beş yakıt için elde edilen değerlerin uygun davranış içinde oldukları söylenebilir.



Şekil 5. 23. Değişik devirlerde tam gaz ve 150 bar enjeksiyon basıncında 100D, 50PE50D, 50AE50D, 100PE ve 100AE yakıtlarının CO₂ değişimleri.

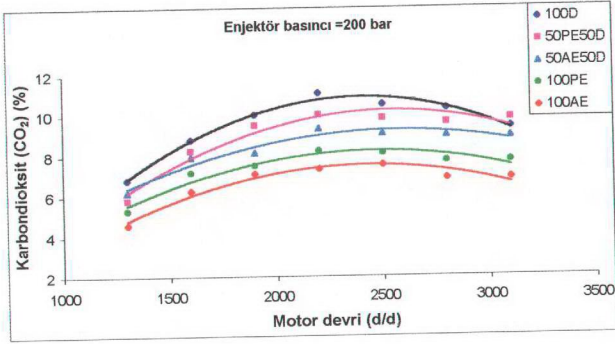
Şekil 5.23’te CO₂ emisyonlarının motor devrine bağlı olarak değişimi görülmektedir. CO₂ emisyonları direkt yanma ile ilgili olduğu için motorun düşük devirlerinde yanma kötüleştiği için düşük olmaktadır. Maksimum momentin oluştuğu devirde yanma iyileştiği için CO₂ oranı da yükselmektedir. 150 bar enjeksiyon basıncında maksimum gücün elde edildiği devir olan 3100 d/d’da dizel yakıtı için CO₂

miktarı %5.81, 50PE50D için %5.48, 50AE50D için %5.23, 100PE için %4.94 ve 100AE için de %4.80 olarak gerçekleşmiştir. 2200 d/d'da dizel yakıtı için CO₂ miktarı %6.74, 50PE50D için %6.52, 50AE50D için %6.22, 100PE için %5.87 ve 100AE için de %5.45 olduğu görülmektedir. Sıcaklığın düşük olması ile CO₂ miktarı da düşmektedir. Bunun sebebi düşük sıcaklıkta CO'in CO₂'e dönüşümü azalma eğilimi göstermektedir. Egzoz çıkış sıcaklıkları incelendiği vakit, en yüksek sıcaklığın orta devirlerde olduğu görülür. Buna göre en yüksek CO₂ miktarı da yine bu devirlerde gerçekleşmektedir.

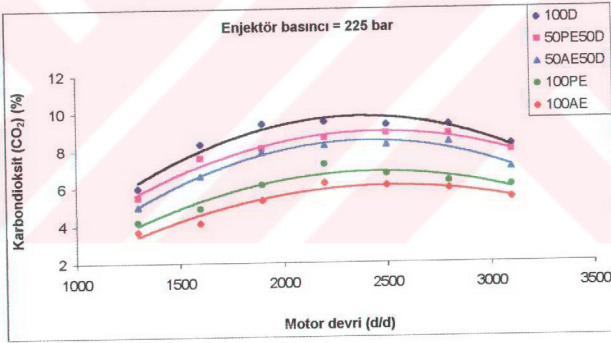


Şekil 5. 24. Değişik devirlerde tam gaz ve 175 bar enjeksiyon basıncında 100D, 50PE50D, 50AE50D, 100PE ve 100AE yakıtlarının CO₂ değişimleri.

Şekil 5.24'de görüldüğü gibi yine aynı şekilde 175 bar enjeksiyon basıncında maksimum gücün elde edildiği devir olan 3100 d/d'da dizel yakıtı için CO₂ miktarı %6.12, 50PE50D için %5.65, 50AE50D için %5.02, 100PE için %5.38 ve 100AE için de %4.81 olarak gerçekleşmiştir. Maksimum momentin meydana geldiği 2200 d/d'da dizel yakıtı için CO₂ miktarı %6.64, 50PE50D için %6.19, 50AE50D için %5.75, 100PE için %5.85 ve 100AE için de %5.49 olduğu görülmektedir.



Şekil 5. 25. Değişik devirlerde tam gaz ve 200 bar enjeksiyon basıncında 100D, 50PE50D, 50AE50D, 100PE ve 100AE yakıtlarının CO_2 değişimleri.

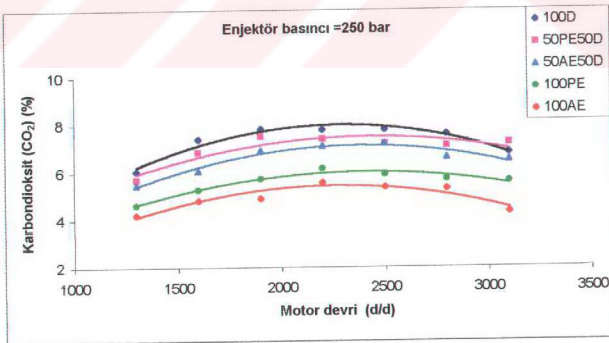


Şekil 5. 26. Değişik devirlerde tam gaz ve 225 bar enjeksiyon basıncında 100D, 50PE50D, 50AE50D, 100PE ve 100AE yakıtlarının CO_2 değişimleri.

Şekil 5.25. incelendiği zaman motorun standart enjeksiyon basıncında (200 bar) bütün yakıtlardaki CO_2 miktarı motorun yüksek devirlerine doğru bir yükseliş

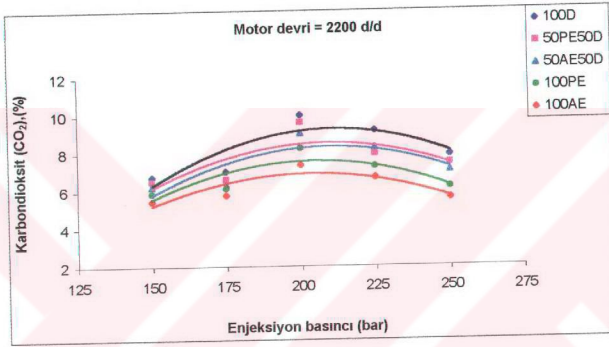
göstermektedir. Yine düşük devirlerde yük artışı için yanma kötüleşmektedir. Maksimum gücün elde edildiği devir olan 3100 d/d'da dizel yakıtı için CO_2 miktarı %9.38, 50PE50D için %9.80, 50AE50D için %8.90, 100PE için %7.70 ve 100AE için de %6.86 olarak gerçekleşmiştir. Maksimum momentin elde edildiği devirde CO_2 miktarı %11.08, 50PE50D için %10.04, 50AE50D için %9.42, 100PE için %8.23 ve 100AE için de %7.34 olduğu görülmektedir.

Şekil 5.26'da CO_2 emisyonlarının devir sayısına bağlı olarak değişimi görülmektedir. 225 bar enjeksiyon basıncında maksimum gücün elde edildiği devir olan 3100 d/d'da dizel yakıtı için CO_2 miktarı %8.27, 50PE50D için %7.96, 50AE50D için %7.03, 100PE için %6.12 ve 100AE için de %5.44 olarak gerçekleşmiştir. Maksimum momentin elde edildiği devir olan 2200 d/d'da karbondioksit emisyonu miktarı dizel yakıtı için %9.73, 50PE50D için %8.67, 50AE50D için %8.26, 100PE için %7.25 ve 100AE için de %6.36 olarak meydana gelmiştir. CO_2 emisyonu ile ilgili şekiller incelendiği vakit, dizel yakıtında oluşan CO_2 gazı daha fazla görülmektedir. Buna karşılık ester oranı arttıkça karbondioksit miktarı da azalmaktadır. En az CO_2 miktarı esterlerde görülmektedir. Masjuki ve arkadaşları (1993) ile Police ve arkadaşlarının bitkisel yağ esterleri ile yapmış oldukları çalışmalarda da benzeri sonuçlar elde edilmiştir.



Şekil 5. 27. Değişik devirlerde tam gaz ve 250 bar enjeksiyon basıncında 100D, 50PE50D, 50AE50D, 100PE ve 100AE yakıtlarının CO_2 değişimleri.

Şekil 5.27'de görüldüğü gibi 250 bar enjeksiyon basıncında maksimum gücün elde edildiği devir olan 3100 d/d'da dizel yakıtı için CO₂ miktarı %6.80, 50PE50D için %7.21, 50AE50D için %6.51, 100PE için %5.60 ve 100AE için de %4.37 olarak gerçekleşmiştir. 2200 d/d'da dizel yakıtı için CO₂ miktarı %7.88, 50PE50D için %7.42, 50AE50D için %7.26, 100PE için %6.15 ve 100AE için de %5.56 olduğu görülmektedir.



Şekil 5. 28. Sabit devir, tam gaz ve değişik enjeksiyon basınçlarında 100D, 50PE50D, 50AE50D, 100PE ve 100AE yakıtlarının karbondioksit (CO₂) değişimleri.

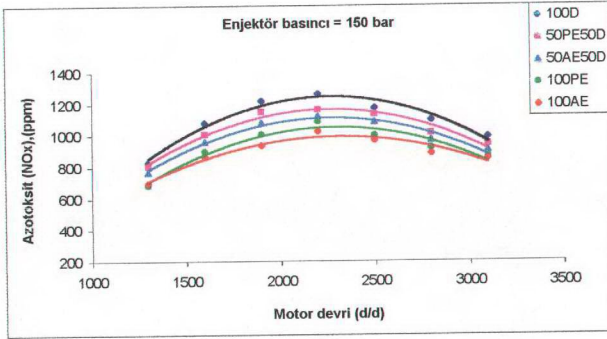
Şekil 5.28. ve Şekil E1.5. incelendiği zaman en düşük CO₂ emisyonunun 150 ve 175 bar enjeksiyon basıncında meydana geldiği görülür. Buradan da dizel yakıtına göre esterlerde daha az CO₂ oluşmaktadır. Hava tüketimleri incelendiği zaman 150 bar ve 250 bar enjeksiyon basınçlarında daha fazla olduğu görülmektedir. Hava tüketimine bağlı olarak yanma işlemi kötüleşmektedir. Yanmanın kötüleşmesi ile CO₂ oranı düşmektedir. 150 bar enjeksiyon basıncında dizel yakıtı için %6.74, karışımlar için %6.52 ve %6.22, 100PE için %5.87 ve 100AE için de %5.45'lik bir CO₂ mevcuttur. 175 bar enjeksiyon basıncında dizel yakıtı %6.64, karışımlar %6.19 ile %5.75, 100PE

%5.85 ve 100AE %5.49'luk bir CO₂ emisyonu vermiştir. 200 bar enjeksiyon basıncında dizel yakıtı için %11.08, karışımlar için %10.04 ve %9.42, 100PE için %8.23 ve 100AE için de %7.34 'lük bir CO₂ mevcuttur. 225 bar enjeksiyon basıncında dizel yakıtı için %9.73, karışımlar için %8.67 ve %8.26, 100PE için %7.25 ve 100AE için de %6.36'lık CO₂ mevcuttur. 250 bar enjeksiyon basıncında dizel yakıtı için %7.88, karışımlar için %7.42 ve %7.26, 100PE için %6.15 ve 100AE için de %5.56'lık CO₂ mevcuttur. En yüksek karbondioksit oranı standart enjeksiyon basıncından meydana gelmiştir. moment ve güç değerleri de incelendiği vakiten yüksek değerler 200 bar enjeksiyon basıncından elde edilmiştir. O halde en iyi yanma bu enjeksiyon basıncından sağlanmıştır.

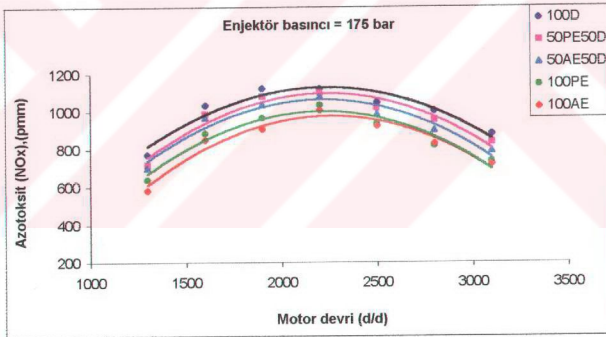
5. 6. Azotoksit (NO_x) Emisyonları

Azotoksitlerinin oluşumunda hava-yakıt oranı ile sıcaklığın önemli bir rolü vardır. Sıcaklığın yükselmesi sonucunda yeterli oksijen varsa NO_x emisyonları yükselirler. Düşük hızlarda artan hava miktarı yanmayı iyileştirir, buna bağlı olarak sıcaklık yükselmesi olur ve sıcaklığın yükselmesine bağlı olarak basınç da artar ve NO_x miktarı da yükselmeye başlar. Silindir içinde yeteri kadar hava mevcut değilse iyi bir yanma olmaz, dolayısıyla sıcaklık düşer ve NO_x emisyonları da düşer. Alev çekirdeğinde, silindir cidarlarında ve egzoz çıkışında da NO_x oluşumu devam eder.

NO_x emisyonlarının artması, yanma odasına sürülen hava yakıt miktarına da bağlı olmaktadır. (3.13), (3.14) ve (3.29) ifadelerine göre atomik oksijen ve azot elementinden dolayı NO_x emisyonlarının oluşum hızı artmaktadır. Oksijenin atomik oksijene ayrılması da sıcaklığın yükselmesine bağlı olarak yükselmektedir.



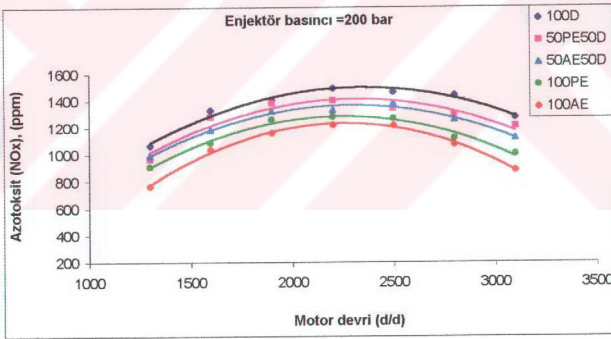
Şekil 5. 29. Değişik devirlerde tam gaz ve 150 bar enjeksiyon basıncında 100D, 50PE50D, 50AE50D, 100PE ve 100AE yakıtlarının NO_x değişimleri.



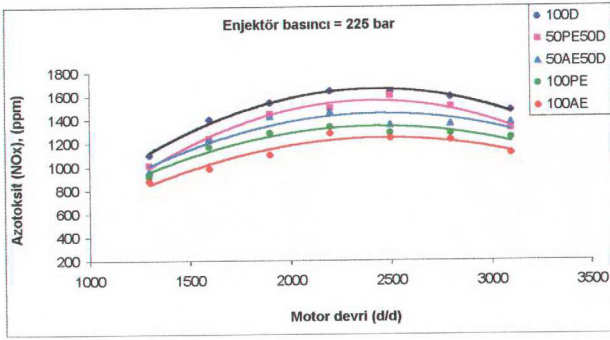
Şekil 5. 30. Değişik devirlerde, tam gaz ve 175 bar enjeksiyon basıncında 100D, 50PE50D, 50AE50D, 100PE ve 100AE yakıtlarının NO_x değişimleri.

Şekil 5.29. ve 5.30. incelendiği zaman düşük ve yüksek devirlerde orta devirlere nazaran NO_x emisyonları düşmektedir. Buna göre egzoz emisyon çıkış sıcaklığı orta devirlerde 600°C 'a yaklaşmakta ve diğer devirlerde 500°C civarında seyretmektedir.

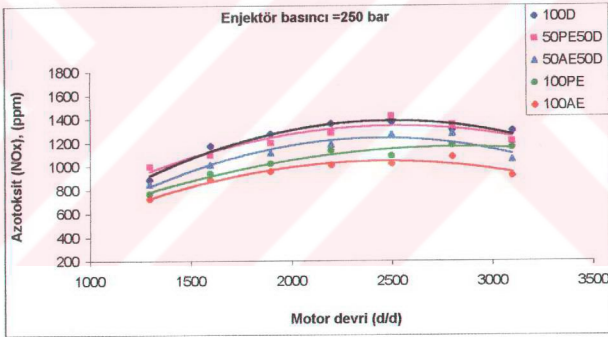
Maksimum momentin elde edildiği devir olan 2200 d/d'da 150 bar enjeksiyon basıncında dizel yakıtı için 1265 ppm, 50PE50D için 1165 ppm, 50AE50D için 1121 ppm, 100PE için 1089 ppm ve 100AE için 1026 ppm NO_x emisyonu gerçekleşmiştir. Motorun enjeksiyon basıncı 175 bara yükselince dizel yakıtı için 1120 ppm, 50PE50D için 1101 ppm, 50AE50D için 1080 ppm, 100PE için 1035 ppm ve 100AE için 1028 ppm olduğu görülmektedir. Bu değerler Sapuan ve arkadaşlarının (1996) bitkisel yağ ile yapmış oldukları çalışmaya uymaktadır. Burada saf olarak kullanılan esterler dizel yakıtından biraz daha az NO_x emisyonu vermiştir. Clark ve arkadaşları (1984) ile Booth ve arkadaşlarının (1993) bitkisel yağların metil ve etil esterleri ile dizel motorlarında yapmış oldukları çalışmadan da esterlerin NO_x emisyonları dizel yakıtına oranla daha az görülmüştür. NO_x oluşumu, yanma sonu sıcaklığı ile ilişkilidir. Yanma sıcaklığının 1800°K 'nin üzerine çıkması ile azotoksit oluşumu meydana gelmektedir. Burada dizel yakıtının yanma sonu sıcaklığı karışım ve esterlerden yüksek olduğu için NO_x miktarı da dizel yakıtında diğer yakıtlara oranla yüksek olmaktadır.



Şekil 5. 31. Değişik devirlerde, tam gaz ve 200 bar enjeksiyon basıncında 100D, 50PE50D, 50AE50D, 100PE ve 100AE yakıtlarının NO_x değişimleri.



Şekil 5. 32. Değişik devirlerde, tam gaz ve 225 bar enjeksiyon basıncında 100D, 50PE50D, 50AE50D, 100PE ve 100AE yakıtlarının NO_x değişimleri.

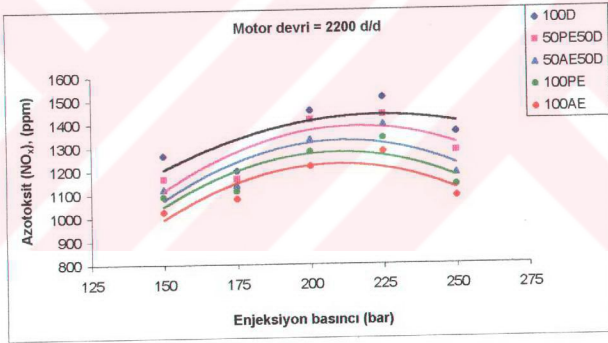


Şekil 5. 33. Değişik devirlerde, tam gaz ve 250 bar enjeksiyon basıncında 100D, 50PE50D, 50AE50D, 100PE ve 100AE yakıtlarının NO_x değişimleri.

Şekil 5.31. ve 5.32. incelendiği vakit motorun standart enjeksiyon basıncında ve maksimum momentin elde edildiği devir olan 2200 d/d'da dizel yakıtı için 1492 ppm, 50PE50D için 1412 ppm ve 50AE50D için 1331 ppm, 100PE için 1280 ppm ve 100AE için 1218 ppm NO_x emisyonu gerçekleşmiştir. Motorun enjeksiyon basıncı 225 bara

yükselince dizel yakıtı için 1640 ppm, 50PE50D için 1497 ppm ve 50AE50D için 1463 ppm, 100PE için 1337 ppm ve 100AE için 1280 ppm olduğu görülmektedir. Egzoz gazı sıcaklığı saf esterlerde dizel yakıtına göre biraz daha düşük olmaktadır. Ayrıca dizel yakıtının ısıl değeri ve tutuşma kabiliyeti yüksek olduğu için yanma sonu sıcaklığı da yüksek olmakta ve dolayısıyla 100D yakıtında diğer yakıtlara oranla NO_x emisyonları da artış göstermektedir. Enjeksiyon basıncı 250 bara çıkınca maksimum moment devrinde saf esterlerin NO_x emisyon değerleri dizel yakıtına oranla düşük çıkmıştır.

Şekil 5.33. incelendiği vakit motorun 250 bar enjeksiyon basıncı ve 2200 d/d motor hızında dizel yakıtı için 1360 ppm, 50PE50D için 1280 ppm ve 50AE50D için 1185 ppm, 100PE için 1135 ppm ve 100AE için 1012 ppm NO_x emisyonu gerçekleşmiştir. Enjeksiyon basıncı 250 bara çıkınca maksimum moment devrinde saf esterlerin NO_x emisyon değerleri dizel yakıtına oranla düşük çıkmıştır. Hava fazlalık katsayısının 1'e yaklaşması ile silindir cidarının soğuma etkisi azalmakta ve egzoz sistemi daha sıcak kalmaktadır. Bundan dolayı NO_x emisyonları da artmaktadır.



Şekil 5. 34 Sabit devir, tam gaz ve değişik enjeksiyon basınçlarında 100D, 50PE50D, 50AE50D, 100PE ve 100AE yakıtlarının azotoksit (NO_x) değişimleri.

Şekil 5.34.ve Şekil E1.6'da görüldüğü gibi NO_x emisyonları enjeksiyon basıncının yükselmesi ile yükselmekte ve tekrar düşmektedir. 150 bar enjeksiyon basıncı ve 2200 d/d motor hızında dizel yakıtı için 1265 ppm, 50PE50D için 1165 ppm, 50AE50D için 1121 ppm, 100PE için 1089 ppm ve 100AE yakıtı için de 1026 ppm

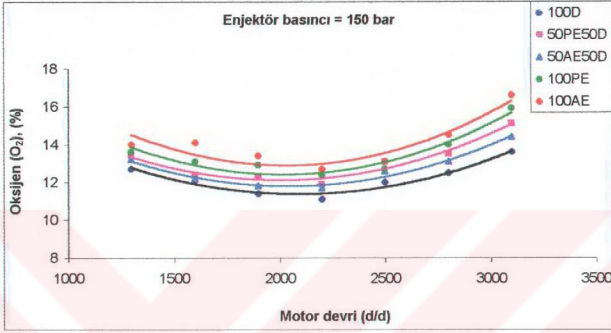
azotoksit emisyonu gerçekleşmiştir. Aynı devir ve 175 bar enjeksiyon basıncında sırasıyla 1120, 1101, 1080, 1035 ve 1008 ppm NO_x oluşmuştur. Enjeksiyon basıncının 200 bar basınca yükselmesi ile azotoksit miktarı da yükselmiştir. 100D için 1492 ppm, 50PE50D için 1417 ppm, 50AE50D için 1331 ppm, 100PE için 1280 ppm ve 100AE için 1219 ppm azotoksit gerçekleşmiştir. 225 bar enjeksiyon basıncında NO_x miktarı sırasıyla 1640, 1497, 1463, 1337 ve 1280 ppm olmuştur. 250 bar basınçta ise 100D ile 1360 ppm, 50PE50D ile 1280 ppm, 50AE50D ile 1185 ppm, 100PE ile 1135 ppm ve 100AE ile 1012 ppm NO_x oluşmuştur.

Azotoksit oluşumunu hava yakıt oranı, yanma sıcaklığı, yanma odasının şekli, karışım teşkili, tutuşma gecikmesi, yanma bölgesinin soğuma hızı ve fazla hava etkilemektedir. Yanma olayında fazla havanın azaltılması azotoksitleri azaltsa dahi karbon monoksit ile yanmamış hidrokarbonların miktarını artırır. Yanma için kullanılan hava miktarına bakıldığı zaman 3100 d/d motor hızında en fazla havanın 225 bar enjeksiyon basıncında kullanıldığı görülür. Egzoz çıkış sıcaklığı incelendiği zaman en yüksek değerler bütün yakıtlar için motorun 225 bar enjeksiyon basıncında görülmektedir. Buna göre egzoz çıkış sıcaklığı her beş enjeksiyon basıncı için de 2200 d/d ve daha yüksek motor devirlerinde görülmektedir. Bilindiği gibi azot oksit emisyonlarının oluşumu için yüksek sıcaklık (1800°K) değerlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Yüksek yanma sıcaklığında azot oksitlerin oluşum hızı daha yüksektir. Yanma esnasında çok kuvvetli bir karışım oluşursa NO_x emisyonları azalır. NO_x'leri azaltmak için yanma sırasında maksimum sıcaklığının düşürülmesi lazımdır. Esterlerin yanma sonu sıcaklığının düşük olması sebebiyle dizel yakıtına nazaran düşük NO_x emisyonları vermektedirler. Esterlerin ısı değeri dizel yakıtına oranla düşük olması sebebiyle yanma sonu sıcaklığı da düşük olur. Buna göre yüksek egzoz gazı sıcaklığında azotoksitlerin oluşumu literatürde yapılan çalışmalarla uygunluk içindedir.

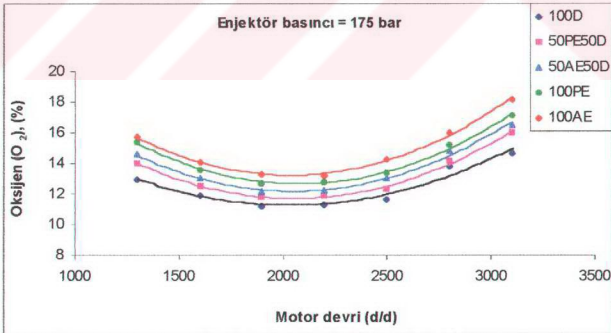
5.7. Oksijen (O₂) Miktarı

Egzoz emisyon ürünlerinden olan O₂, havanın ve yakıtın içinde bulunan oksijenden ibarettir. Dizel yakıtı, pamuk ve ayçiçeği yağı metil esterleri ve bunların dizel yakıtı ile yapılan karışımlarının yakıt olarak kullanılması ile yapılan deneylerde

oksijen emisyonları değerlerinin motor devrine göre değişimi grafikler halinde verilmiştir. Bu grafikler incelendiği vakit, oksijen miktarı düşer ve bir minimumdan geçerek tekrar yükseldiği görülür. Minimumdan geçmesi genellikle motor momentinin maksimum olduğu motor devrine denk geldiği görülmektedir. Bu devirde yanma iyi olduğu için alınan oksijenin çoğu yanma işlemine harcanmaktadır.

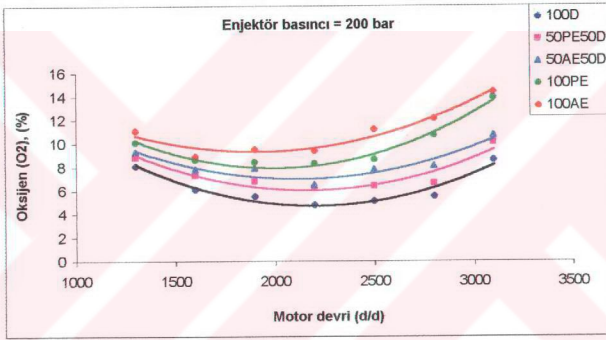


Şekil 5. 35. Değişik devirlerde, tam gaz ve 150 bar enjeksiyon basıncında 100D, 50PE50D, 50AE50D, 100PE ve 100AE yakıtlarının oksijen (O_2) değişimleri.



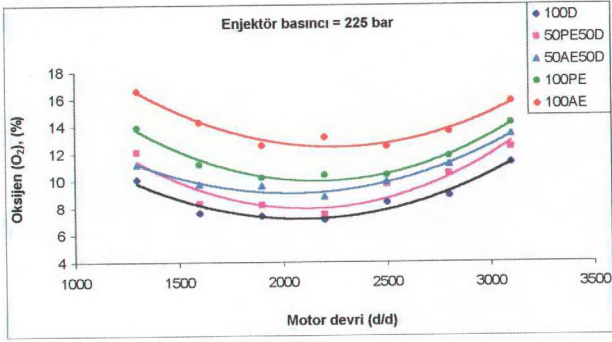
Şekil 5. 36. Değişik devirlerde, tam gaz ve 175 bar enjeksiyon basıncında 100D, 50PE50D, 50AE50D, 100PE ve 100AE yakıtlarının oksijen (O_2) değişimleri.

Şekil 5.35. incelendiği vakit maksimum momentin elde edildiği devir olan 2200 d/d'da 150 bar enjeksiyon basıncında dizel yakıtı için %11.1 O_2 , karışımlar için %11.9 O_2 ve %11.7 O_2 , 100PE için %12.4 O_2 ve 100AE için %12.7 O_2 emisyonu gerçekleşmiştir. Motorun enjeksiyon basıncı 175 bara yükselince (Şekil 5.36.) dizel yakıtı için %11.3 O_2 , 50PE50D için %11.8 O_2 , 50AE50D %12.2 O_2 , 100PE için %12.8 O_2 ve 100AE için %13.2 O_2 olduğu görülmektedir. Motorun bu iki enjeksiyon basıncından da saf esterlerin oksijen emisyon miktarının fazla olduğu görülmektedir. Bunun asıl sebebi bu yakıtların kimyasal yapı itibarı ile oksijen bulundurmaları ve bu yakıtların tam yanmasında yapısındaki oksijenin de yanmaya iştirak etmesinden dolayı oksijen fazlalığı ortaya çıkmaktadır.

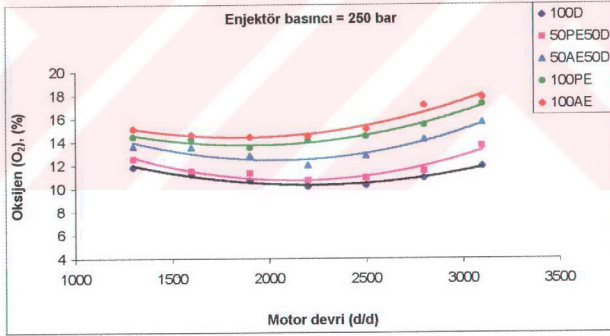


Şekil 5. 37. Değişik devirlerde, tam gaz ve 200 bar enjeksiyon basıncında 100D, 50PE50D, 50AE50D, 100PE ve 100AE yakıtlarının oksijen (O_2) değişimleri.

Şekil 5.37. incelendiği vakit maksimum momentin elde edildiği devir olan 2200 d/d'da 200 bar standart enjeksiyon basıncında dizel yakıtı için %4.8 O_2 , 50PE50D için %6.2 O_2 , 50AE50D %6.5 O_2 , 100PE için %8.3 O_2 ve 100AE için %9.4 O_2 emisyonu gerçekleşmiştir. Tüketilen gerçek hava miktarı incelendiği vakit, düşük devirlerde az ve yüksek devirlerde daha fazla olduğu görülmektedir. Aynı zamanda esterlerin içeriğinde oksijen mevcut olduğu için esterlerin yanmasında atılan oksijen miktarı daha fazladır.

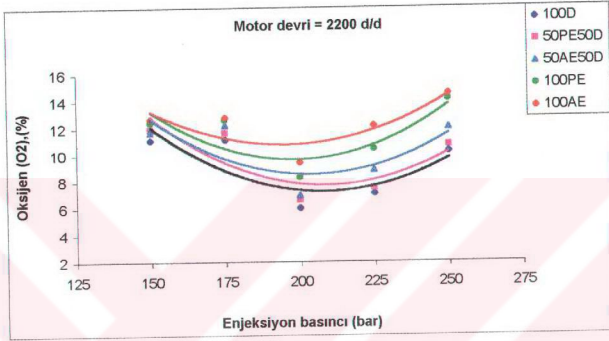


Şekil 5. 38. Değişik devirlerde, tam gaz ve 225 bar enjeksiyon basıncında 100D, 50PE50D, 50AE50D, 100PE ve 100AE yakıtlarının oksijen (O₂) değişimleri.



Şekil 5. 39. Değişik devirlerde, tam gaz ve 250 bar enjeksiyon basıncında 100D, 50PE50D, 50AE50D, 100PE ve 100AE yakıtlarının oksijen (O₂) değişimleri.

Şekil 5.38. incelendiği vakit motorun enjeksiyon basıncı 225 bara yükselince dizel yakıtı için %7.1 O₂, 50PE50D için %7.5 O₂, 50AE50D için %8.8 O₂, 100PE için %10.4 O₂ ve 100AE için %13.2 O₂ olduğu görülmektedir. Benzer şekilde motorun enjeksiyon basıncı 250 bara yükselince (Şekil 5.39.) dizel yakıtı için %10.2 O₂, 50PE50D için %10.7 O₂ ve 50AE50D için %12.0 O₂, 100PE için %14.1 O₂ ve 100AE için %14.5 O₂ olarak gerçekleştiği görülmektedir.



Şekil 5.40. Sabit devir, tam gaz ve değişik enjeksiyon basınçlarında 100D, 50PE50D, 50AE50D, 100PE ve 100AE yakıtlarının oksijen (O₂) değişimleri.

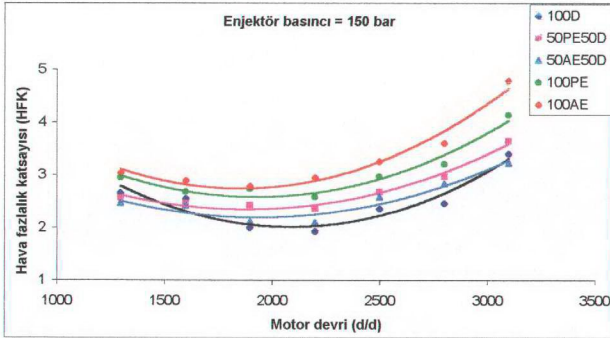
Şekil 5.40. ve Şekil E1.7. incelendiği vakit enjeksiyon basıncına göre oksijenin değişimi görülmektedir. En düşük oksijen yüzdesi motorun standart enjeksiyon basıncı olan 200 bar basınçta olmaktadır. 150 ve 175 bar enjeksiyon basınçlarından bütün yakıtlar için oksijen miktarı az bir fark göstermektedir. Esterlerin oksijen miktarları dizel yakıtından daha yüksek çıkmaktadır. Fakat 150 ve 175 bar enjeksiyon basınçlarında elde edilen güç ve moment değerleri dizel yakıtına yakın olmaktadır. Diğer enjeksiyon basınçlarında dizel yakıtı ile esterler arasındaki güç ve moment farkı, oksijen miktarındaki fark gibi biraz daha artmaktadır. Esterlerin kimyasal yapısından oksijenin bulunması, oksijen yüzdesinin dizel yakıtına göre yüksek çıkmasına sebep teşkil etmektedir. Motorun gerçek hava tüketimi incelenirse, 2200 d/d'lık motor hızında dizel yakıtı, karışım ve esterlerde 175 ile 250 bar enjeksiyon basıncında diğer enjeksiyon basınçlarına nazaran daha fazla olduğu

görülmektedir. Dizel motorlarında her zaman hava fazlalığı vardır, bu yüzden egzoz gazı içerisinde kısmen O_2 bulunması normaldir. Alınan bu havanın bir kısmının oksijeni reaksiyona girmeden dışarı atıldığı görülmektedir.

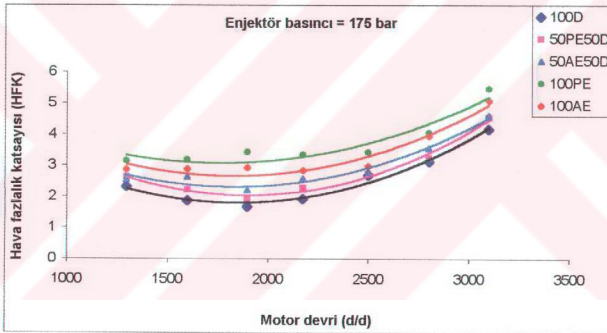
5. 8. Hava Fazlalık Katsayısı

Dizel motorlarında sıkıştırılmış havanın içine püskürtülen yakıtın tamamının ısıya dönüşmesi için yakıtın tamamının yanması gerekir. Bunun için yeterli kadar oksijene ve dolayısıyla havaya ihtiyaç vardır. Her yakıtın kimyasal yapısına bağlı olarak tam yanması için teorik bir hava miktarına ihtiyaç vardır ki, bu hava miktarına stokiyometrik hava miktarı denir. Dizel motorlarda karışım doğrudan doğruya silindire içerisine alınmaz, karışım ancak silindire içinde oluşur ve karışım işlemi tamamlanmadan önce yanma olayı gerçekleşir. Bu durumda, motorun egzozunda yanmamış hidrokarbonlar ile karbonmonoksit gazları bulunmaktadır. Bunu önlemek için yakıtın tamamının yanması gerekir ve bunun için de silindire teorik havadan daha fazla hava gönderilir. Silindire gönderilen hava ile teorik hava miktarı arasındaki orana hava fazlalık katsayısı (λ) denir. Diğer bir deyimle, gerçekte motorun çalışması sırasında gerçekleşen hava/yakıt oranının teorik tam yanma için gerekli hava/yakıt oranına oranıdır. Dizel motorları için önemli bir parametre olan hava fazlalık katsayısı 1.4 civarındadır. Daha düşük değerler için motor isli çalışma bölgesine girer [Borat, vd. 1994].

Deneylerde kullanılan 100D, 50PE50D, 50AE50D, 100PE ve 100AE yakıtlarının hava fazlalık katsayıları değerinin motor devir sayısına bağlı değişimleri grafik şekline dönüştürülerek değerlendirilmiştir.



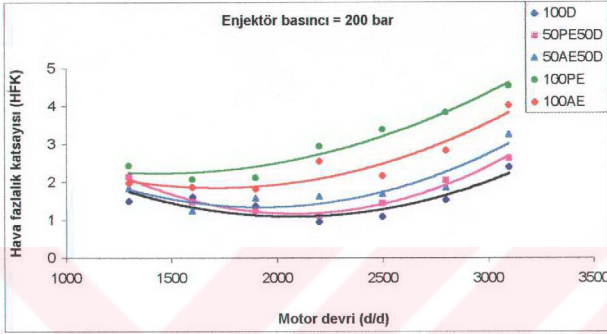
Şekil 5. 41. Değişik devirlerde, tam gaz ve 150 bar enjeksiyon basıncında 100D, 50PE50D, 50AE50D, 100PE ve 100AE yakıtlarının hava fazlalık katsayılarının değişimleri.



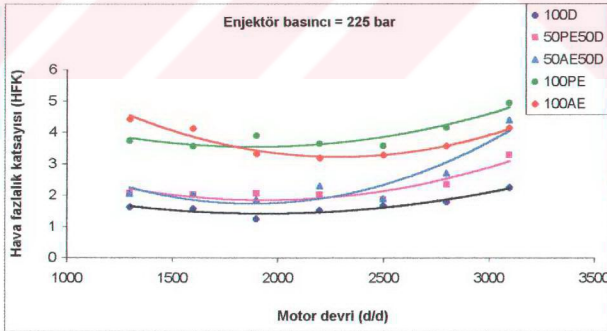
Şekil 5. 42. Değişik devirlerde, tam gaz ve 175 bar enjeksiyon basıncında 100D, 50PE50D, 50AE50D, 100PE ve 100AE yakıtlarının hava fazlalık katsayılarının değişimleri.

Şekil 5.41. incelendiği vakit maksimum momentin elde edildiği devir olan 2200 d/d'da 150 bar enjeksiyon basıncında hava fazlalık katsayısının diğer devirlere göre daha az olduğu görülmektedir. Bu devirde hava fazlalık katsayısı dizel yakıtı için 1.92, karışımlarda 50PE50D için 2.35 ve 50AE50D için 2.09, 100PE için 2.58 ve 100AE için 2.94 olarak gerçekleşmiştir. Motorun enjeksiyon basıncı 175 bara yükselince

(Şekil 5.42.) HFK, dizel yakıtı için 1.92, 50PE50D için 2.28, 50AE50D için 2.58, 100PE için 3.34 ve 100AE için 2.83 olduğu görülmektedir. Şekil 5.41. ve Şekil 5.42.'de görüldüğü gibi her iki enjeksiyon basıncında da dizel yakıtına göre hava fazlalık katsayısı, esterlerde daha fazla gerçekleşmiştir.

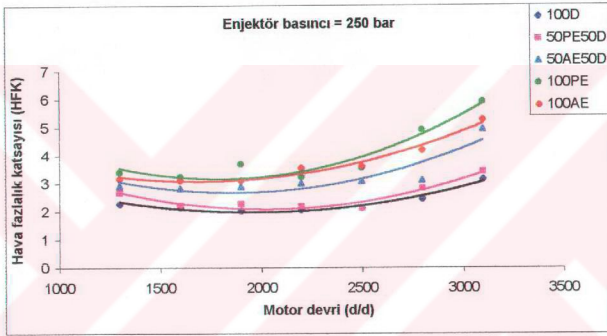


Şekil 5.43. Değişik devirlerde, tam gaz ve 200 bar enjeksiyon basıncında 100D, 50PE50D, 50AE50D, 100PE ve 100AE yakıtlarının hava fazlalık katsayılarının değişimleri.



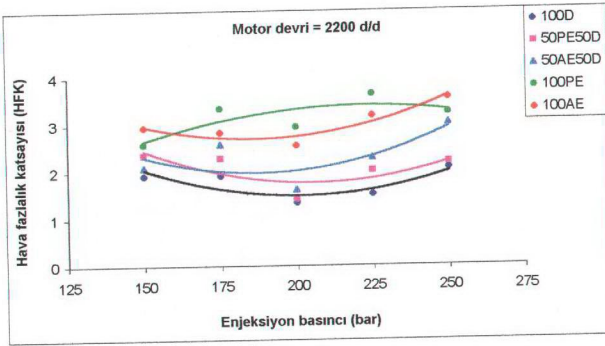
Şekil 5.44. Değişik devirlerde, tam gaz ve 225 bar enjeksiyon basıncında 100D, 50PE50D, 50AE50D, 100PE ve 100AE yakıtlarının hava fazlalık katsayılarının değişimleri.

Şekil 5.43. ve 5.44. incelendiği vakit maksimum momentin elde edildiği devir olan 2200 d/d'da 200 bar standart enjeksiyon basıncında hava fazlalık katsayısının diğer devirlerdeki hava fazlalık katsayısına göre daha az olduğu görülmektedir. Bu devirde hava fazlalık katsayısı dizel yakıtı için 1.34, karışımlar için 1.11 ve 1.62, 100PE için 2.94 ve 100AE için 2.55 olarak gerçekleşmiştir. Motorun enjeksiyon basıncı 225 bara yükselince HFK, dizel yakıtı için 1.51, karışımlar için 2.01 ve 2.28, 100PE için 3.63 ve 100AE için 3.18 olduğu görülmektedir. Her iki enjeksiyon basıncında da dizel yakıtına göre hava fazlalık katsayısı, esterlerde daha fazla gerçekleşmiştir.



Şekil 5.45. Değişik devirlerde, tam gaz ve 250 bar enjeksiyon basıncında 100D, 50PE50D, 50AE50D, 100PE ve 100AE yakıtlarının hava fazlalık katsayılarının değişimleri.

Şekil 5.45. incelendiği vakit maksimum momentin elde edildiği devir olan 2200 d/d'da 250 bar enjeksiyon basıncında hava fazlalık katsayısının diğer devirlere göre daha az olduğu görülmektedir. Bu devirde hava fazlalık katsayısı dizel yakıtı için 2.06, karışımlarda 50PE50D için 2.18 ve 50AE50D için 3.01, 100PE için 3.23 ve 100AE için 3.55 olarak gerçekleşmiştir.

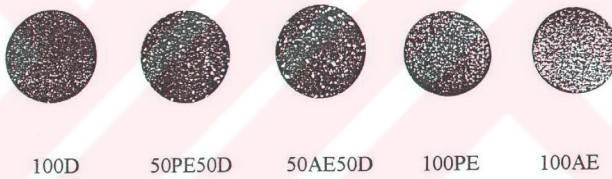


Şekil 5. 46. Sabit devir, tam gaz ve değişik enjeksiyon basınçlarında 100D, 50PE50D, 50AE50D, 100PE ve 100AE yakıtlarının hava fazlalık katsayısı değişimleri.

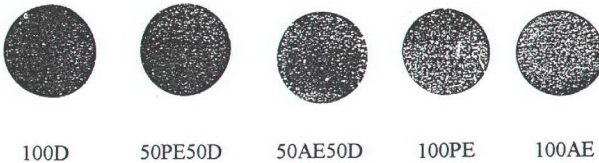
Şekil 5.46.ve Şekil E1.8. incelendiği vakit hava fazlalık katsayısı 150 bar basınçta dizel yakıtında düşük, karışım ve esterlerden daha yüksek çıkmıştır. 175 bar basınçta esterlerin hava fazlalık katsayısı daha yüksektir. 200 bar enjeksiyon basıncında dizel yakıtı için 1.4'ün altına düşmüş bazı motor devirleri mevcuttur. 225 bar enjeksiyon basıncında esterlerin HFK yüksek değerler almaktadır. 250 bar enjeksiyon basıncında dizel yakıtı ve diğerleri de yükselmektedir. Bütün enjeksiyon basınçlarında dizel yakıtının HFK değeri karışım ve saf esterlerden daha küçüktür. Saf esterlerin HFK değerleri bütün enjeksiyon basınçlarında da yüksektir. En düşük HFK değerleri maksimum momentin elde edildiği devire yakın olmaktadır. Motorun çalışması da bu devirde yani 2200 d/d'da daha düzgün olmaktadır ve CO₂ miktarı da fazla çıkmaktadır. HFK > 1 olduğu zaman fakir karışım oluşmaktadır ve karışım teşkili homojen olmadığı için bazı zengin karışım bölgeleri ortaya çıkabilir. Bunun için tam yanma yerine eksik yanma meydana gelmektedir. Hava fazlalık katsayısı 1'e yaklaştığı zaman silindir cidarlarının soğuması azalır ve egzoz sistemi sıcak kalır, dolayısıyla azot oksitleri de artar. Egzoz çıkış sıcaklığı da sözkonusu devirde yanma egzozda da devam ettiği için daha yüksek değerler almaktadır.

5.9. Duman Koyuluğu

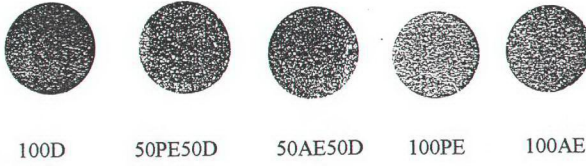
Egzoz gazı içerisinde bulunan is veya partikül olarak adlandırılan parçacıkların filtre kağıdından geçmeyip üzerinde siyah lekeler bırakması ile duman koyuluğu belirlenmiştir. Cihazın probuna yerleştirilen filtre kağıdının siyahlık derecesi egzoz içinde is miktarı hakkında fikir vermektedir. Filtre kağıdındaki siyahlık derecesi incelendiği vakit dizel yakıtındaki siyahlık, karışım ve saf esterlerin siyahlığından daha fazla görülmektedir. Literatürde yapılan metil esteri çalışmalarından da esterlerin is birikimlerinin dizel yakıtına nazaran daha az oldukları belirtilmiştir. İs miktarının motorun hızına, yük durumuna ve gaz kolu konumuna göre değişmektedir. Teorik çalışmada elde edilen (3.55) eşitliğine göre de yük arttıkça ve yakıt buharı ile oksijen miktarının artması ile is miktarı artmaktadır. Yine sıcaklık ve silindir basıncına göre is miktarı artar ve azalır. Motor yükünün artması ile beraber is miktarı da artmaktadır.



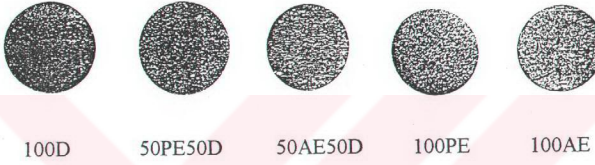
Şekil 5. 47. 150 bar enjeksiyon basıncı ve 3100 d/d'daki is oluşumu.



Şekil 5. 48. 175 bar enjeksiyon basıncı ve 3100 d/d'daki is oluşumu.



Şekil 5. 49. 200 bar enjeksiyon basıncı ve 3100 d/d'daki is oluşumu.



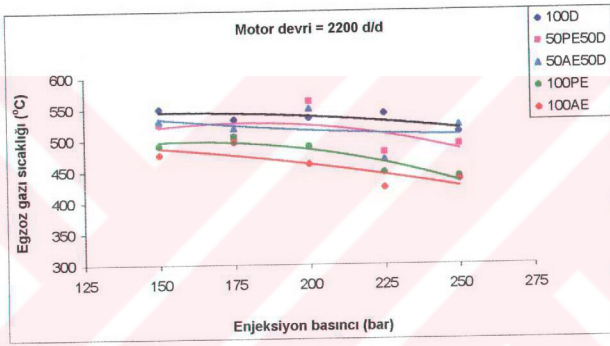
Şekil 5. 50. 225 bar enjeksiyon basıncı ve 3100 d/d'daki is oluşumu.



Şekil 5. 51. 250 bar enjeksiyon basıncı ve 3100 d/d'daki is oluşumu.

Motorun çeşitli devirlerinde yapılan deneylerde değişik enjektör basınçları kullanılmıştır. Enjeksiyon zamanında silindirin içindeki hava 50 ile 100 bar basınca, 1000°K sıcaklığa ve 15 ile 20 kg/m³lük bir yoğunluğa sahiptir. Püskürtülen yakıtın ilk jet hızı 100 m/s'den daha büyüktür. Damlacıklar halinde yakıt havanın içine püskürtülünce sıkıştırılmış havanın kütlesi spreyin hızını düşürür. Giren damlacıklar

püskürtülünce sıkıştırılmış havanın kütlesi spreyin hızını düşürür. Giren damlacıklar sıkışan havanın içinde buharlaşır. Sıkışan hava ile püskürtülen yakıt spreyinin basıncı yanmayı etkileyen faktörlerdir. İlk buharlaşan damlacıklar yakıtın buhar hava karışımını sağlar. İş miktarı sıcaklıkla değiştiği gibi yakıt buharının miktarı ile (3.55) ifadesine göre değişmektedir. Dizel yakıtının esterlere göre buharlaşması fazla olduğu için iş miktarı da fazla çıkmaktadır. Eşdeğer oran, sprey sınırında sıfır ve merkez çizgisinde en yüksek değere ulaşır. Bunun için yakıt spreyi, yanma odasının girişinde nüfuziyet sağlamaktadır. Motorun sabit hızlarında enjeksiyon basıncının değişimi ile motor performans ve emisyon ürün değerleri enjeksiyon basıncına göre incelenmiştir.



Şekil 5. 52. Sabit devir, tam gaz ve değişik enjeksiyon basınçlarında 100D, 50PE50D, 50AE50D, 100PE ve 100AE yakıtlarının egzoz gazı sıcaklığı değişimleri.

Şekil 5.52. ve Şekil E1.9'da görüldüğü gibi bütün yakıtların egzoz gazı sıcaklığı yüksek enjeksiyon basıncında düşmektedir. Egzoz gazı sıcaklığının yüksek olduğu yakıtın dizel yakıtı olduğu ve en düşük yakıtların da esterler olduğu görülmektedir. Karışımlar bunların arasında yer almaktadır. Yakıtların ısı değerlerine bakıldığı vakit dizel yakıtının daha yüksek, esterlerin daha düşük ve karışımların da arada olduğu görülür. Isıl değeri yüksek olan yakıtlar daha fazla enerji vermekte ve dışarı atılan enerjinin de aynı oranda olduğu görülmektedir. Yanmanın süngen olması, yanma süresinin uzaması halinde yanma egzozda da devam etmekte ve egzoz gazlarının da sıcaklığı artmaktadır.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

İnsanların yaşamaları için gerekli olan enerji yeryüzünde büyük bir önem taşımaktadır. Petrol ve petrol ürünlerinden elde edilen enerjilerin sonlu olması, yeni ve yenilenebilir enerji kaynaklarının araştırılmasını zorunlu hale getirmiştir. Yenilenebilir enerji kaynakları rüzgar, güneş enerjisi, hidrojen ve jeotermal enerjileri hergün azalan petrol, kömür ve doğal gazın yerine geçmesi kaçınılmaz bir hale gelecektir.

Bu çalışmada fabrikalarda üretilen ham ayçiçek ve ham pamuk çekirdeği yağlarından metil ester yakıtları üretilmiştir. Elde edilen bu yakıtların fiziksel ve kimyasal özellikleri üzerinde de çalışmalar yapılmıştır. Bunların özellikleri motorin veya mazot olarak adlandırılan dizel yakıtına yakın olduklarından tek silindirli bir motor üzerinde performans ve egzoz emisyonlarının etkisini değerlendirmek için tam gaz ve motorun değişik devirlerinde denenmiştir.

Değişik enjeksiyon basınçları ve motor devirlerinde yapılan deneylerde motorun standart enjeksiyon basıncı olan 200 bar basınçta motorun düşük ve yüksek devirlerinde dizel yakıtına oranla 100AE yakıtı düşük moment değerleri vermiştir. Ancak 100PE yakıtı dizel yakıtına yakın moment değerleri vermiştir. Yine 50PE50D ve 50AE50D yakıtları da dizel yakıtına yakın değerler vermiştir. Maksimum moment devrinde (2200 d/d) 100D ile 100PE yakıtları arasında %4'lük bir düşüş mevcuttur. 100AE yakıtı ise %9 daha düşük moment vermiştir.

Enjeksiyon basıncı 175 bar olduğunda dizel yakıtı ile 19.75 Nm'lik moment elde edilirken pamuk esterinin dizel yakıtı ile karışımında 19.50 Nm'lik moment, 50AE50D ile %3'lük bir düşüş, 100PE ile %4'lük bir düşüş ve 100AE ile %5'lik bir düşüş elde edilmiştir. 150 bar enjeksiyon basıncında dizel yakıtı ile 19.50 Nm'lik moment elde edilmiştir. Karışımlar ile %1'lik bir düşüş ve aynı değerde moment sağlanmıştır. 100PE ile 18.75 Nm ve 100AE ile %4'lük bir düşüş kaydedilmiştir. 225 enjeksiyon basıncında 2200 d/d'da 100D ile 18.50 Nm, karışımlar ile 18.25 ve 17.75 Nm, 100PE ile 17.25 Nm ve 100AE ile 16.50 Nm'lik moment elde edilmiştir. 250 bar enjeksiyon basıncında dizel yakıtı ile pamuk yağı metil ester ile dizel karışımı iyi sonuç vermiştir. Buna göre sözkonusu deney motorunda standart enjeksiyon basıncının altındaki basınçlarda esterler ile dizel yakıtı arasındaki fark azdır.

Motor gücü incelendiği zaman maksimum gücün elde edildiği 3100 d/d'da ve 200 bar enjeksiyon basıncında dizel yakıtı ve karışımlar birbirlerine yakın güç verirken 100PE yakıtı %4'lük bir düşüş göstermiştir. 100AE ise %7'lik bir güç düşüşü göstermiştir. Burada iki ester arasında fazla bir fark görülmemektedir. Fakat aynı basınç ve diğer devirlerde de bu şekilde önemli bir fark görülmemektedir. 175 bar enjeksiyon basıncında bütün yakıtlar birbirlerine yakın güç değerleri vermiştir ve bu güç değerleri arasındaki fark dizel yakıtı ile 100AE yakıtı arasında olan %3'lük bir fark olarak görülmektedir. 150 bar enjeksiyon basıncında saf esterler ile dizel yakıtı arasında %3 ve %4'lük bir düşüş mevcuttur. 100 D için 5.11 kW, 100PE için 4.95 kW, 100AE için 4.86 kW, 50PE50D için 5.03 kW ve 50AE50D 4.95 kW'lık güç elde edilmiştir. 225 bar enjeksiyon basıncında pamuk yağı esteri ile dizel yakıtı karışımı yakın ve diğerleri ise düşük değerler vermiştir. 250 bar enjeksiyon basıncında ise dizel yakıtı en yüksek ve 100AE yakıtı da en düşük güç değerleri vermiştir. Buna göre standart enjeksiyon basıncının altındaki iki basınçta saf esterler dizel yakıtına alternatif olabilecek performansı göstermişlerdir. Standart ve üstündeki basınçlarda bu esterlerin dizel yakıtı ile %50 oranındaki karışımları kullanılabilir.

Minimum özgül yakıt tüketimi dikkate alındığında 150 bar enjeksiyon basıncı ve 2200 d/d motor hızında dizel yakıtı ile esterler arasındaki fark %9'luk bir artıştır. 175 bar enjeksiyon basıncında esterler %4 - %7 daha fazladır. 200 bar enjeksiyon basıncında özgül yakıt tüketimi esterlerde %3 ile %7 arasında değişen bir artış göstermiştir. Enjeksiyon basıncı 225 bara yükselince esterler ile dizel yakıtı arasındaki özgül yakıt tüketimi %8 - %11 daha fazladır. 250 bar enjeksiyon basıncında ise esterler dizel yakıtına göre %4 - %6 arasında değişen oranlarda artış olmuştur. Dizel yakıtı ile ester karışımlarında, dizel yakıtına oranla %2 - %4 fazla olmaktadır. Metil esterler ve karışımların alt ısı değerleri dizel yakıtına göre düşük oldukları için gerekli olan gücün elde edilmesinde daha fazla ağırlıkta yakıtın tüketilmesi gerekmektedir.

Deneyler sırasında motorda eksik yanma sonucu oluşan CO gazı incelendiğinde, maksimum CO miktarının olduğu devirde bütün enjeksiyon basınçlarında esterler dizel yakıtına oranla daha düşük CO gazı vermektedir.

NO_x emisyonları incelendiğinde, esterler yavaş yandığı için ve düşük egzoz sıcaklığına bağlı olarak düşük NO_x ürünleri vermektedir. 200 bar enjeksiyon basıncında

dizel yakıtına göre esterlerde %15 - 20'ye varan bir azalma görülmektedir. Diğer basınçlarda da yaklaşık aynı oranlarda bir NO_x emisyon azalması mevcuttur.

Duman koyuluğu bakımından, filtre kağıtları üzerindeki isin birikimine göre esterlerin daha az duman koyuluğuna sahip olduğu görülmektedir. Diğer yağların esterleri ile yapılan çalışmalardan da esterlerin dizel yakıtına göre daha az is ürettikleri literatürde belirtilmiştir. Bu bakımdan bitkisel yağların metil esterleri çevreyi daha az kirlettiği görülmektedir.

Bu çalışmanın ışığı altında şu sonuçlar ortaya çıkmaktadır:

- a. Pamuk ve ayçiçek yağı metil esterlerinin fiziksel özellikleri dizel yakıtına benzemektedir.
- b. Pamuk ve ayçiçek yağı metil esterlerinin ısı değerleri dizel yakıtına yakındır.
- c. Bitkisel yağların metil esterlerinin motor performansına etkisi, bu esterlerin dizel yakıtına alternatif olabileceğini göstermektedir.
- d. Pamuk ve ayçiçek yağı metil esterlerinin özgül enerji tüketimleri, ısı değerinin dizel yakıtından daha düşük olmasından dolayı fazladır.
- e. Bitkisel yağların alternatif dizel yakıtı olarak kullanılmasının büyük avantajı, yenilenebilir enerji kaynağı olmalarıdır.
- f. Ham veya rafine edilmiş pamuk ve ayçiçek yağı bütün yerleşim birimlerinde kolayca temin edilebilir.
- g. Pamuk ve ayçiçeği bitkileri Türkiye ve dünyanın bir çok yerinde bol miktarda ve rahatlıkla yetiştirilebilir.
- h. Dizel motorlar üzerinde hiçbir değişiklik yapılmadan bu yağların esterleri rahatlıkla kullanılabilir.
- i. Ester yakıtlarından oluşan NO_x ürünü dizel yakıtına göre yaklaşık %10 - 12 daha düşüktür.
- j. Duman koyuluğu ve partikül oluşumu dizel yakıtına oranla daha azdır.
- k. CO ve diğer zararlı gazlar dizel yakıtına göre daha azdır.

Öneriler :

Yapılan deneylerin sonuçlarına göre pamuk ve ayçiçeği yağı metil esterleri performans bakımından dizel yakıtına benzer sonuçlar verdiği görülmektedir. Güç ve emisyonlar bakımından ele alındığında bu yakıtlar dizel yakıtına alternatif olabilir. Ancak uzun vadede bu yağların metil esterlerinin biraz daha iyileştirilmesi sonucu motorun ilk hareketinin dizel yakıtına benzer şekilde kolay olması sağlanabilir. Bu esterler ümit verici oldukları için çok yönlü olarak denenmeli ve özellikle iyi bir atomizasyon sağlayarak daha iyi bir yanma elde etmek için enjektörün meme çapı değiştirilmelidir. Buna göre yağ esterlerine uygun atomizasyon ve basınç değerleri bulunmalıdır.

Pamuk ve ayçiçeği bitkilerinin bol miktarda üretilmesi ve fiyatlarının düşürülmesi gerekmektedir. Bu yağların metil esterlerinin üretimi ve kullanımının yaygın hale getirilmesi teşvik edilmelidir. Vizkozite, ısıl değer ve setan sayısının dizel yakıtına yaklaştırılması için ısıtılması veya katkı ilavesi gibi kimyasal işlemlere tabi tutulması gerekir.

KAYNAKLAR

- Adams, C., Peters, J.F., Rand, M.C., Schroer, B.J. and Ziemke, M.C. (1983), Investigation of Soyabean Oil as a Diesel Fuel Extender: Endurance Tests, **JAOCS**, vol.60, no. 8.
- Aksoy, H.A., Kahraman, I., Karaosmanoğlu, F. and Civelekoğlu, H. (1988), Evaluation of Turkish Sulphur Olive Oil as an Alternative Diesel Fuel, **JAOCS**, vol.65, no. 6.
- Allen, J. and Wilson, N. (1994), Enhanced Combustion and Reduced Emissions Using Valve Train Systems, **IMEchE**, MEP, London.
- Allen, R. And Bowen. R. (1993), **Mathematical Simulation of the Transient Performance of a Petrol Engine**, University of Southamton, no. 930855.
- Altın, R. (1988), **Bitkisel Yağların Dizel Motorlarında Kullanılmasının Deneysel Olarak İncelenmesi**, G.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Ankara, 1998.
- Andrews, G.E. and Ghazikhani, M. (1993), The Reduction of Diesel Particulate Emissions Using an Ignition Improver, **IMEchE**, MEP, London.
- Asmus, A. and Wellington, B. (1993), **Diesel Engine and Fuel Systems**, Third Edition, Printed in Malaysia.
- Backer, L.F., Jacobsen, L. and Olson, J.C. (1983), Farm-Scale Recovry and Filtation Characteristics of Sunflower Oil for Use in Diesel Engines, **JAOCS**, vol. 60, no. 8.
- Bata, R., Wang, W., Gautan, M., Lyons, D.W., Clark, N., Palmer, M., Ferguson, D. and Katragadda, S. (1992), Fleet – Site Measurements of Exhaust Gas Emissions From Urban Buses, **ASME**, ICE – vol. 18.
- Befrul, B.A., Wlesler, B. And Winklhofer, E. (1991), The Propagation of Fuel Sprays in a Research Diesel Engine – A Joint Numerical and Experimental Analysis, **SAE** paper, no. 910181.
- Belardini, P., Bertoli, C. and Giacomo, D.N. (1993), Soot Formation and Oxidation in a DI Diesel Engine; A Comparison Between Measurments and Three Dimensinal Computation, **SAE** paper, no. 932658.

- Boam, D.J., Finlay, I.C., Ma, T.H., Wallace, S., Bloomfield, J.H. and Lee, R. (1993), **Modal Assessment of Hydrocarbons Reduction Technologies in a Vehicle During Engine Warm-up**, **IMechE**, MEP, London.
- Booth, M., Marriott, J.M. and Rivers, K. J. (1993), **Diesel fuel quality in an environmentally-conscious world**, **IMechE**, MEP, London.
- Borat, O., Balcı, M. ve Sürmen, A. (1994), **İçten Yanmalı Motorlar Cilt-1**, Teknik Eğitim Vakfı Yayınları, Matbaa Eğitimi Bölümü, Ankara.
- Borat, O., Balcı, M. ve Sürmen, A. (1994), **Hava Kirlenmesi ve Kontrol Tekniği**, Teknik Eğitim Vakfı Yayınları, Matbaa Eğitimi Bölümü, Ankara.
- Cantoni, U. (1993), **Alternative Fuels Utilization in Fuel Cell for Transportation**, TMC, Advanced Engineering Research Group, p.no. 931816.
- Cernej, A., Dobovisek, Z. And Kegl, B. (1993), **Fundamental Study on NO_x Yield From Fuel – Bound Nitrogen**, **IMechE**, MEP, London.
- Chekel, M.D. (1993), **The Alternative Fuel Decision and Current CNG Conversion Systems**, **ASME**, Emerging Energy Technology, PD – Vol. 50.
- Christie, W.W. (1989), **Gas Chromatography and Lipids**, The Oily Press, Scotland.
- Cowley, L.T., Le Jeune, A. and Lange, W.W. (1993), **Effect of Fuel Composition Including Aromatics Content on Emission From a Range of Heavy – Duty Diesel Engines**, **IMechE**, MEP, London.
- Crookes, R.J., Kiannajad, F. and Nazha, M.A.A. (1993), **Performance and Emissions of a 2.5 litre Multy-Sylinder Direct – Injection Automotive Diesel Engine with Alternative Diesel Fuels and Emulsions**, **IMechE**, MEP, London.
- Clark, S.J., Wagner, L., Schrock, M.D. and Piennaar, P.G. (1984), **Methyl and Ethyl Soyabean Esters as Renewable Fuels for Diesel Engines**, **JAOCS**, vol.61, no.10.
- Culshaw, F. (1993), **The Potantial of Biodiesel, from Oilseed Rape**, **IMechE**, MEP, London.
- Çelik, İ., Wang, Y.Z., Crawford, B.G. and Lyons, D.W. (1992). **A Numerical Study of Diesel Engine Emissions From Combustion of Various Fuels**, **ASME**, vol. 18.
- Çetinkaya, S. (1995), **The Potential of Using Sunflower Oil as a Fuel for Diesel Engines**, **Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi**, Cilt 17, no: 4.

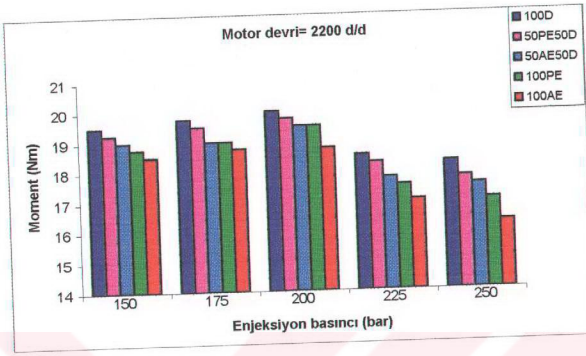
- Davies, M., Blaikley, D.C.W., Jorgensen, N., Webster, D.E. and Wilkins, A.J.J. (1993), **Catalitic Control of Diesel Particulate Emissions**, IMechI, MEP, London.
- Demirsoy, M. ve Kindiroğlu, K., (1997), Dizel Motorlarında Alternatif Yakıt Olarak Değişik Yağların Kullanılması, **1.Uluslararası Katılımlı Otomotiv Teknolojisi Kongresi**, Ç.Ü. Müh. Mim. Fak. Mak. Müh. Böl., Adana.
- Dunne, J.M. and Greening P.J. (1993), European Emission Standards to the Year 2000, **IMechH**, MEP, London
- Eastop, T.D. and Mc Conkey, A. (1993), **Applied Thermodynamics for Engineering Technologists**, Fifth Edition, Printed in Singapore.
- Engler, C.R., Johnson, L.A., Lepori, W.A. and Yarbrough, C.M. (1983), Effects of Processing and Chemical Characteristics of Plant Oils On Performance of an Indirect-Injection Diesel Engine, **JAOCs**, vol. 60, no. 8.
- Frank, R.M. and Heywood, J.B. (1991), The Effect of Piston Temperature on Hydrocarbon Emissions from a Spark – Ignited Direct – Injection Engine, **SAE** paper, No. 910558.
- Gambino, M., Corbo, P., Iannaccone, S., Unich, A. and Bata, R. (1993), High Turbulence Combustion Chamber for Lean-Burn Heavy-Duty CNG Engines, **ASME**, ICE-Vol. 20.
- Gülensoy, H. (1982), **Kimya Mühendisliği Stokiyometrisi**, Fatih Yayınevi Matbaası, İstanbul.
- Haq, MD.Z. (1995), **Study of the Property of Vegetable Oil as an Alternative to Diesel Fuel**, Msc. Thesis, Dhaka.
- Heaton, D.M., Martin, B., Bertoli, C. And Giavazzi, F. (1993), Fuel Composition Effects on Diesel Engine Emissions – a Joint European Study, **IMechE**, MEP, London.
- Heinze, P. (1993), The Influence of Diesel Fuel Properties and Components on Emissions from Diesel Engines, **IMechE**, MEP, London.
- Heywood, J.B., (1988), **Internal Combustion Engine Fundamental**, Mc Graw-Hill Book Comp., New York.
- Horrocks, R.W. (1993), Light Duty Diesel – an Update on the Emission Challenge, **IMechH**, MEP, London.

- Jankowski, A., Seczyk, J., Rekxa, M. and Sitnik, L. (1994), Rape Seed Oil Methyl Ester Fuel as Alternative Diesel Fuel for High Speed Diesel Engines for Urban Buses, **ASME, ICE** – Vol. 24.
- Karimi, E.R. and Jane, A.H. (1994), A Combustion System Investigation to Achieve Low Emissions on a Heavy Duty Diesel Engine, **IMechE, MEP**, London.
- Klopfenstein, W.E. and Walker, H.S. (1983), Efficiencies of Various Esters of Fatty Acids as Diesel Fuels, **JAOCS**, vol.60, no.8.
- Korus, R.A., Jo, J. And peterson, C.L. (1985), A Rapid Engine Test to Measure Injector Fouling in Diesel Engine Using Vegetable Oil Fuels, **JAOCS**, vol.62, no. 11.
- Lowry, J.P.A. (1990), Alternative Fuel for Automotive and Stationary Engines in Developing Country, **IMechE**, Seminar, London.
- Masjuki, H., Zaki, A.M. and Sapuan, S.M. (1993), Methyl Ester of Palm Oil as an Alternative Diesel Fuel, **IMechE, MEP**, London.
- Moriarty, P. (1994), **Can Alternative Car Fuels Reduce Greenhouse Gas Emissions?**, Int. J. of Vehicle Design, vol. 15.
- Nagano, S., Kawazoe, H. and Ohsawa, K. (1991), Reduction of Soot Emission by Air –Jet Turbulance in a DI Diesel Engine, Toyota Central Research and Development Labs, no. 912353.
- Nye, M.J., Williamson, T. W. And others. (1983). Conversion of Used Frying Oil to Diesel Fuel by Transesterification; Preliminary Tests, **JAOCS**, vol. 60, no.8.
- Ottikkutti, P., Gerpen, J.V. and Cui, K.R. (1991), Multizone Modeling of a Fumigated Diesel Engine, **SAE** paper, no. 910076.
- Peterson, C.L., Auld, D.L. and Korus, R.A. (1983), Winter Rape Oil Fuel for Diesel Engines; Recovery and Utilization, **JAOCS**, vol. 60, no. 8.
- Pipho, M.J., Kittelson, D.B. and Zarling, D.D. (191), **NO₂ Formation in a Diesel Engine**, Dept. of Mech. Engineering University of Minnoseta, no. 910231.
- Police, G., Prati, M.V., Auriemma, M. and Alfuso, S. (1993), Regulated Emissions of DI Diesel Engines Fuelled with Methyl Ester of Rape Seed Oil, **IMechE, MEP**, London.
- Pryde, E.H. (1983), Vegetable Oils as Fuel Alternatives – Symposium Overview, **JAOCS**, vol.61, no.10.
- Pryde, E.H. (1983), Vegetable Oils as Diesel Fuels, **JAOCS**, vol. 60, no. 8.

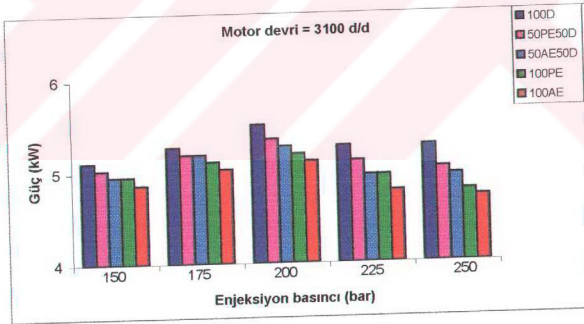
- Ramos, J.I. (1989), **Internal Combustion Engine Modeling**, Carnegio-Mellon University Dept. of Mech. Eng., Hemisphere Publishing Corporation, New York.
- Ruiz, F. (1991), Thermodynamic Modelling of the Two – Cylinder Regenerative Internal Combustion Engine, SAE paper, no. 910346.
- Sapuan, S.M., Masjuki, H.H. and Azlan, A. (1996), The Use of Palm Oil as Diesel Fuel Substitute, IMechE, vol. 210.
- Sato, K., Ukawa, H. and Nakano, M. (1991), **Effective Energy Utilization and Emissions Reduction of the Exhaust Gas in a Two – Stroke Cycle Engine**, Shibaura Institute of Technology, paper no. 911848.
- Seebold, C.R. (1989). **The Interaction Between Unburnt Hydrocarbons and Soot in Diesel Exhaust**, PhD Thesis, Polytechnic Saut West.
- Smith, M.J. and Hawley, M.D. (1993), Start Again! Engine and Vehicle Designers Set Free by a Quiet Revolution in Transmissions, I Mech E, Selected Paper from AUTOTECH'93, MEP, London.
- Strayer, R.C., Blake, J.A. and Craig, W.K. (1983), Canola and High Erucic Rapeseed Oil as Substitutes for Diesel Fuel: Preliminary Tests, JAOCS, vol. 60, no. 8.
- TSE, (1994), **Egzoz Gazı Kirleticileri – Trafikteki Dizel Motorlu Taşıtlar İçin – Ölçüm Metodu ve Sınır Değerleri**, TS 11365, Ankara.
- TSE, (1991), **Karayolu Taşıtları–Otomobiller Yakıt Ekonomisi Tayini**, TS 1984, Ankara.
- TSE, (1988), **Benzin veya Dizel Motorlarında Kirleticı Gazların Emisyonuna Göre Taşıtların Tip ve Kabul Deneyleri**, TS 5648, Ankara.
- TSE, (1988), **Motorlu Karayolu Taşıtlarının Gaz Kirleticileri İçin Emisyon Sınır Değerleri**, TS 4236, Ankara.
- Schwalh, J.A. and Ryan, M. T.W. (1992), Emissions Measurement in an Steady Combusting Spray Simulating the Diesel Combustion Chamber, SAE paper no. 920185.
- Shen, Y., Andrews, G.E. and William, P.T. (1993), The Influence of Cetane Number at Constant Density and Low Aromatic Content on Diesel Emissions, IMechE, MEP, London.
- Strayer, R.C., Blake, J.A. and Craig, W.K. (1983), Canola and Erucic Rapeseed Oil Subtitutes for Diesel Fuel; Preliminary Tests, JAOCS, vol.60, no.8.

- Uyehara, O. (1991), **A Method to Estimate H₂ in Engine Exhaust and Factors that Affect NO_x and Particulate in Diesel Engine Exhaust**, University of Wisconsin, paper no. 910181.
- Yücel, H.L. (1998), Dizel Yakıtına Belirli Oranlarda Karıştırılmış Pamuk Yağının Motor Performansı ve Emisyon Karakteristikleri Üzerindeki Etkilerinin Araştırılması, Doktora Tezi, F.Ü. Makine Mühendisliği Anabilimdalı, Elazığ.
- Zeng, S. And Ying, S.J. (1993), **Numerical Simulation of Pollutant Emissions in Propane Air Combustion**, University of Sout Florida, Florida 33620.
- Ziejewski, M. and Kaufman, K.R. (1983), Laboratory Endurance Test of an Sunflower Oil Blend in an Diesel Engine, **JAOCs**, vol. 60, no. 8.
- Watson, H.C. and Lu, H. (1993), 25 Years of Emissions Control : Its Costs and Benefits, **IMechH**, MEP, London.
- Willcock, M., Hartley, E.D., Foss, P. And Tidmarsh, D. (1993), An Investigation into the Degredation and Oxidation of Certain Hydrocarbon Species in the Exhaust Manifold of an SI Engine, **I Mech E**, Selected Paper from AUTOTECH'93, MEP, London.
- William, A. and Ani, F. (1990), The Use of Palm Oil as Alternative Diesel Fuel **IMechE**, MEP, London
- Winsor, R.E. (1993), Effect of Fuel Modifications on Dietroit Diesel Exhaust Emissions, **IMechH**, MEP, London.
- Zeng, S. and Ying, B. (1993), Numerical Simulation of Pollutant Emissions in Propane Air Combustion, **American Chemical Society**, no. 93035.

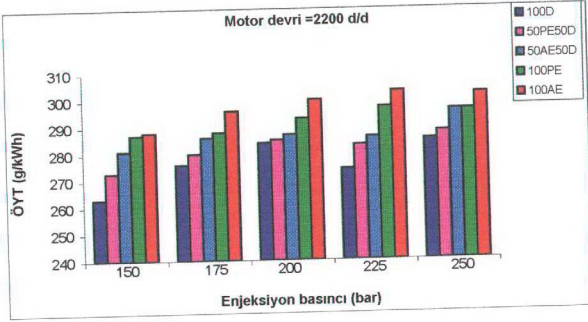
Ek - 1. Sabit devir bar grafikleri.



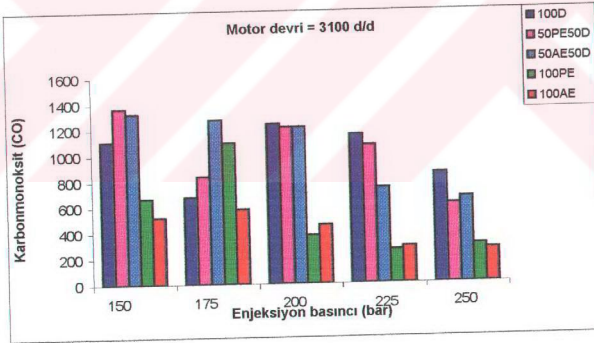
Şekil E1.1. Sabit devir, tam gaz ve değişik enjeksiyon basınçlarında 100D, 50PE50D, 50AE50D, 100PE ve 100AE yakıtlarının moment değişimleri



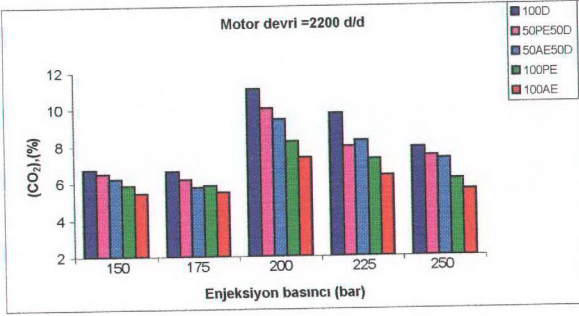
Şekil E1. 2. Sabit devir, tam gaz ve değişik enjeksiyon basınçlarında 100D, 50PE50D, 50AE50D, 100PE ve 100AE yakıtlarının güç değişimleri



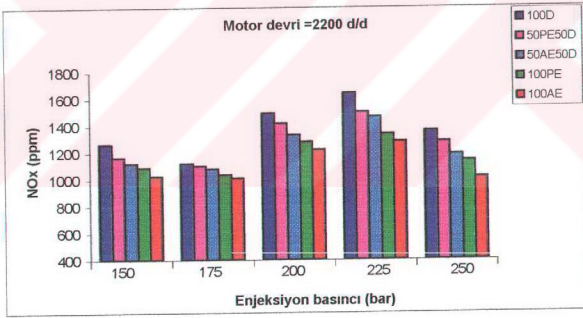
Şekil E1. 3. Sabit devir, tam gaz ve değişik enjeksiyon basınçlarında 100D, 50PE50D, 50AE50D, 100PE ve 100AE yakıtlarının özgül yakıt tüketimi değişimleri.



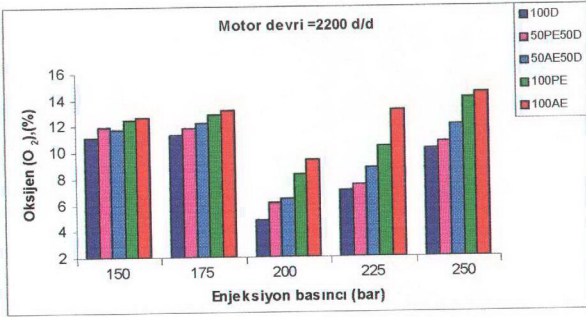
Şekil E1. 4. Sabit devir, tam gaz ve değişik enjeksiyon basınçlarında 100D, 50PE50D, 50AE50D, 100PE ve 100AE yakıtlarının karbonmonoksit (CO) değişimleri.



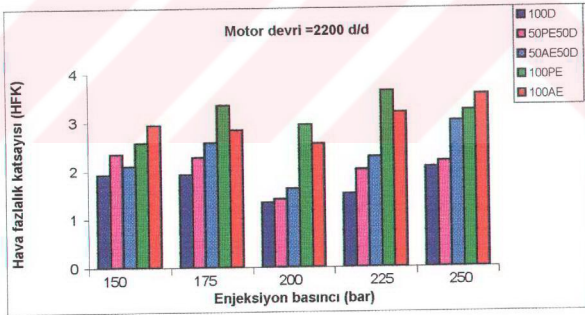
Şekil E1. 5. Sabit devir, tam gaz ve değişik enjeksiyon basınçlarında 100D, 50PE50D, 50AE50D, 100PE ve 100AE yakıtlarının karbondioksit (CO_2) değişimleri.



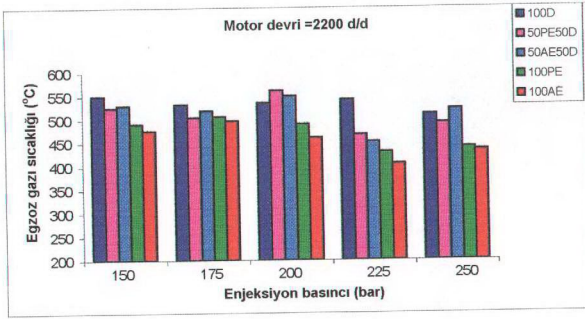
Şekil E1. 6. Sabit devir, tam gaz ve değişik enjeksiyon basınçlarında 100D, 50PE50D, 50AE50D, 100PE ve 100AE yakıtlarının azot oksit (NO_x) değişimleri.



Şekil E1. 7. Sabit devir, tam gaz ve değişik enjeksiyon basınçlarında 100D, 50PE50D, 50AE50D, 100PE ve 100AE yakıtlarının oksijen (O_2) değişimleri.



Şekil E1. 8. Sabit devir, tam gaz ve değişik enjeksiyon basınçlarında 100D, 50PE50D, 50AE50D, 100PE ve 100AE yakıtlarının hava fazlalık katsayısı değişimleri.



Şekil E1. 9. Sabit devir, tam gaz ve değişik enjeksiyon basınçlarında 100D, 50PE50D, 50AE50D, 100PE ve 100AE yakıtlarının egzoz gazı sıcaklığı değişimleri.

Ek -2. 100D, 50PE50D, 50AE50D, 100PE ve 100AE yakıtlarının tam gaz ve değişik motor devirlerindeki motor performans ve egzoz emisyon ürünleri değerleri

Enjeksiyon basıncı = 150 bar

Motor devri = 3100 d/d

Yakıt Cinsi	100D	50PE50D	50AE50D	100PE	100AE
Moment (Nm)	15.75	15.50	15.25	15.25	15.00
Güç (kW)	5.11	5.05	4.95	4.95	54.86
Yakıt Tüketimi (g/dak)	26.50	26.60	27.30	28.40	28.00
Yakıt Tüketimi (kg/h)	1.59	1.60	1.63	1.70	1.68
Özgül Yakıt Tüketimi (g/kWh)	312	318	331	347	345
Hava Tüketimi (mmSS)	71	62	74	67	77
Hava Tüketimi (kg/m ³)	27.97	26.14	28.55	27.17	29.13
Yağ Sıcaklığı (°C)	71	66	65	60	63
Egzoz Çıkış Sıcaklığı (°C)	496	433	479	547	449
Karbonmonoksit (CO), (ppm)	930	1366	1324	667	519
Karbon dioksit (CO ₂), (%)	5.81	5.48	5.23	4.94	4.80
Oksijen (O ₂), (%)	13.6	15.1	14.4	15.9	16.6
Azot Oksitler (NO _x), (ppm)	987	942	903	865	852
Azot dioksit (NO ₂), (mg/Nm ³)	1539	1536	1912	1968	1735
Yanma Verimi (%)	90.7	88.4	88.1	87.4	81.7
Hava Fazlalık Katsayısı	3.40	3.64	3.23	4.13	4.78

Enjeksiyon basıncı = 150 bar

Motor devri = 2800 d/d

Yakıt Cinsi	100D	50PE50D	50AE50D	100PE	100AE
Moment (Nm)	17.00	16.75	17.75	18.25	17.50
Güç (kW)	4.98	4.91	5.20	5.35	5.13
Yakıt Tüketimi (g/dak)	23.5	23.6	24.0	25.6	25.2
Yakıt Tüketimi (kg/h)	1.41	1.42	1.44	1.53	1.51
Özgül Yakıt Tüketimi (g/kWh)	283	287	295	318	307
Hava Tüketimi (mmSS)	56	47	55	46	57
Hava Tüketimi (kg/m ³)	24.83	22.76	24.62	22.51	25.05
Yağ Sıcaklığı (°C)	77	67	69	62	65
Egzoz Çıkış Sıcaklığı (°C)	570	478	577	570	521
Karbonmonoksit (CO), (ppm)	1843	1591	1594	979	530
Karbon dioksit (CO ₂), (%)	6.45	6.13	5.84	5.80	5.54
Oksijen (O ₂), (%)	12.5	13.5	13.1	14.0	14.5
Azot Oksitler (NO _x), (ppm)	1097	1013	968	972	883
Azot dioksit (NO ₂), (mg/Nm ³)	1888	2012	2190	2255	1812
Yanma Verimi (%)	89	87.4	90.5	87.5	90.2
Hava Fazlalık Katsayısı	2.46	2.97	2.83	3.20	3.60

Enjeksiyon basıncı = 150 bar
Motor devri = 2500 d/d

Yakıt Cinsi	100D	50PE50D	50AE50D	100PE	100AE
Moment (Nm)	18.25	16.75	17.75	18.25	17.50
Güç (kW)	4.77	4.64	4.90	5.03	4.64
Yakıt Tüketimi (g/dak)	21.5	21.5	22.2	23.3	22.6
Yakıt Tüketimi (kg/h)	1.29	1.29	1.33	1.40	1.35
Özgül Yakıt Tüketimi (g/kWh)	270	278	282	297	286
Hava Tüketimi (mmSS)	40	38	45	35	46
Hava Tüketimi (kg/m ³)	20.99	20.46	22.27	19.64	22.51
Yağ Sıcaklığı (°C)	80	69	74	65	70
Egzoz Çıkış Sıcaklığı (°C)	572	536	551	548	514
Karbonmonoksit (CO), (ppm)	2970	2473	2108	1141	659
Karbondioksit (CO ₂), (%)	6.56	6.26	6.10	6.17	5.81
Oksijen (O ₂), (%)	12.0	13.1	12.6	12.7	13.1
Azot Oksitler (NO _x), (ppm)	1174	1135	1084	1121	968
Azotdioksit (NO ₂), (mg/Nm ³)	1956	2151	2258	2398	1987
Yanma Verimi (%)	90.4	88.4	89.4	86.3	90.3
Hava Fazlalık Katsayısı	2.35	2.68	2.58	2.97	3.25

Enjeksiyon basıncı = 150 bar
Motor devri = 2200 d/d

Yakıt Cinsi	100D	50PE50D	50AE50D	100PE	100AE
Moment (Nm)	19.50	19.25	19.00	18.75	18.50
Güç (kW)	4.49	4.43	4.37	4.31	4.26
Yakıt Tüketimi (g/dak)	19.6	20.2	20.5	20.8	20.5
Yakıt Tüketimi (kg/h)	1.18	1.21	1.23	1.25	1.23
Özgül Yakıt Tüketimi (g/kWh)	263	273	281	290	281
Hava Tüketimi (mmSS)	30	30	32	28	33
Hava Tüketimi (kg/m ³)	18.18	18.18	18.78	17.56	19.07
Yağ Sıcaklığı (°C)	83	71	78	72	71
Egzoz Çıkış Sıcaklığı (°C)	571	525	530	491	486
Karbonmonoksit (CO), (ppm)	3634	2860	3270	2026	1121
Karbondioksit (CO ₂), (%)	6.74	6.52	6.22	5.87	5.45
Oksijen (O ₂), (%)	11.1	11.9	11.7	12.4	12.7
Azot Oksitler (NO _x), (ppm)	1265	1165	1121	1089	1026
Azotdioksit (NO ₂), (mg/Nm ³)	3672	2262	2368	2489	2047
Yanma Verimi (%)	90.3	90.4	89.7	85.6	89.4
Hava Fazlalık Katsayısı	1.92	2.35	2.09	2.58	3.94

Enjeksiyon basıncı = 150 bar
Motor devri = 1900 d/d

Yakıt Cinsi	100D	50PE50D	50AE50D	100PE	100AE
Moment (Nm)	19.25	19.50	19.50	19.25	18.25
Güç (kW)	3.83	3.87	3.84	3.83	3.63
Yakıt Tüketimi (g/dak)	17.3	18.2	18.0	18.2	17.8
Yakıt Tüketimi (kg/h)	1.04	1.09	1.08	1.09	1.06
Özgül Yakıt Tüketimi (g/kWh)	272	283	285	284	284
Hava Tüketimi (mmSS)	20	24	20	25	23
Hava Tüketimi (kg/m ³)	14.84	16.26	14.84	16.60	15.92
Yağ Sıcaklığı (°C)	85	77	82	74	76
Egzoz Çıkış Sıcaklığı (°C)	544	517	527	475	461
Karbonmonoksit (CO), (ppm)	3870	3420	3812	2396	1396
Karbondioksit (CO ₂), (%)	6.70	6.33	6.25	5.62	5.56
Oksijen (O ₂), (%)	11.4	12.3	11.8	12.9	13.4
Azot Oksitler (NO _x), (ppm)	1220	1149	1183	1149	935
Azotdioksit (NO ₂), (mg/Nm ³)	1987	2152	2412	2348	1919
Yanma Verimi (%)	91.3	92.1	90.6	88.4	90.8
Hava Fazlalık Katsayısı	2.00	2.42	2.11	2.73	2.78

Enjeksiyon basıncı =150 bar
Motor devri = 1600 d/d

Yakıt Cinsi	100D	50PE50D	50AE50D	100PE	100AE
Moment (Nm)	18.25	18.50	18.75	18.75	16.75
Güç (kW)	3.05	3.09	3.14	3.14	2.76
Yakıt Tüketimi (g/dak)	14.5	14.7	15.3	15.4	15.50
Yakıt Tüketimi (kg/h)	0.87	0.88	0.92	0.92	0.93
Özgül Yakıt Tüketimi (g/kWh)	285	288	297	304	289
Hava Tüketimi (mmSS)	14	17	14	15	15
Hava Tüketimi (kg/m ³)	12.42	13.68	12.42	12.85	12.85
Yağ Sıcaklığı (°C)	86	86	83	78	81
Egzoz Çıkış Sıcaklığı (°C)	519	485	506	453	445
Karbonmonoksit (CO), (ppm)	3760	3840	3780	2950	1411
Karbondioksit (CO ₂), (%)	6.12	6.24	6.13	5.70	5.06
Oksijen (O ₂), (%)	12.1	12.4	12.2	13.1	14.1
Azot Oksitler (NO _x), (ppm)	1080	1106	1006	997	865
Azotdioksit (NO ₂), (mg/Nm ³)	1309	1733	2045	2398	1623
Yanma Verimi (%)	90.2	93.0	91.6	90.2	93.3
Hava Fazlalık Katsayısı	2.55	2.46	2.42	2.68	2.89

Enjeksiyon basıncı = 150 bar
Motor devri = 1300 d/d

Yakıt Cinsi	100D	50PE50D	50AE50D	100PE	100AE
Moment (Nm)	16.25	17.75	16.75	17.25	15.50
Güç (kW)	2.21	2.41	2.28	2.34	2.12
Yakıt Tüketimi (g/dak)	11.2	12.2	11.5	12.2	12.0
Yakıt Tüketimi (kg/h)	0.67	0.73	0.69	0.72	0.69
Özgül Yakıt Tüketimi (g/kWh)	303	316	317	308	308
Hava Tüketimi (mmSS)	12	15	12	12	12
Hava Tüketimi (kg/m ³)	11.50	12.85	11.50	11.50	11.50
Yağ Sıcaklığı (°C)	88	88	85	80	82
Egzoz Çıkış Sıcaklığı (°C)	480	460	481	432	442
Karbonmonoksit (CO), (ppm)	3950	3673	3920	3302	1620
Karbondioksit (CO ₂), (%)	5.71	5.23	4.92	4.65	5.06
Oksijen (O ₂), (%)	12.7	13.4	13.2	13.6	14.1
Azot Oksitler (NO _x), (ppm)	826	806	768	694	697
Azotdioksit (NO ₂), (mg/Nm ³)	1264	1636	1650	1890	1356
Yanma Verimi (%)	89.7	93.1	91.8	90.5	93.8
Hava Fazlalık Katsayısı	2.65	2.56	2.46	2.94	3.03

Enjeksiyon basıncı = 175 bar
Motor devri = 3100 d/d

Yakıt Cinsi	100D	50PE50D	50AE50D	100PE	100AE
Moment (Nm)	16.25	16.00	16.00	15.75	15.50
Güç (kW)	5.27	5.19	5.19	5.11	5.03
Yakıt Tüketimi (g/dak)	26.8	27.8	27.3	28.0	28.0
Yakıt Tüketimi (kg/h)	1.61	1.67	1.64	1.68	1.64
Özgül Yakıt Tüketimi (g/kWh)	305	321	315	328	326
Hava Tüketimi (mmSS)	72	72	72	66	74
Hava Tüketimi (kg/m ³)	28.17	28.17	28.17	26.97	28.55
Yağ Sıcaklığı (°C)	69	68	66	61	61
Egzoz Çıkış Sıcaklığı (°C)	450	420	490	454	422
Karbonmonoksit (CO), (ppm)	576	835	1272	1094	580
Karbondioksit (CO ₂), (%)	6.12	5.65	5.02	5.38	4.81
Oksijen (O ₂), (%)	15.2	16.0	16.54	17.1	17.6
Azot Oksitler (NO _x), (ppm)	880	835	790	734	720
Azotdioksit (NO ₂), (mg/Nm ³)	1181	1316	1357	1552	1626
Yanma Verimi (%)	86.1	85.5	86.7	89.9	90.7
Hava Fazlalık Katsayısı	4.17	4.53	4.60	5.46	5.08

Enjeksiyon basıncı = 175 bar

Motor devri = 2800 d/d

Yakıt Cinsi	100D	50PE50D	50AE50D	100PE	100AE
Moment (Nm)	17.75	17.50	18.00	17.50	16.75
Güç (kW)	5.20	5.13	5.17	5.13	4.91
Yakıt Tüketimi (g/dak)	25.0	24.5	24.5	25.8	25.6
Yakıt Tüketimi (kg/h)	1.51	1.47	1.47	1.55	1.54
Özgül Yakıt Tüketimi (g/kWh)	287	286	291	302	313
Hava Tüketimi (mmSS)	57	56	55	52	59
Hava Tüketimi (kg/m ³)	25.06	24.84	24.62	23.94	25.50
Yağ Sıcaklığı (°C)	71	71	67	63	62
Egzoz Çıkış Sıcaklığı (°C)	530	544	548	556	524
Karbonmonoksit (CO), (ppm)	1572	1502	1604	1325	605
Karbondioksit (CO ₂), (%)	6.48	5.62	5.12	5.48	4.92
Oksijen (O ₂), (%)	13.8	14.2	14.8	15.2	15.7
Azot Oksitler (NO _x), (ppm)	1013	953	902	818	829
Azotdioksit (NO ₂), (mg/Nm ³)	1439	1626	1590	1962	1726
Yanma Verimi (%)	89.0	89.9	89.1	91.7	92.2
Hava Fazlalık Katsayısı	3.12	3.23	3.55	4.06	3.95

Enjeksiyon basıncı = 175 bar

Motor devri = 2500 d/d

Yakıt Cinsi	100D	50PE50D	50AE50D	100PE	100AE
Moment (Nm)	19.00	18.75	17.75	17.75	17.50
Güç (kW)	4.87	4.90	4.90	4.90	4.58
Yakıt Tüketimi (g/dak)	22.2	22.6	22.4	22.8	22.5
Yakıt Tüketimi (kg/h)	1.33	1.35	1.33	1.37	1.35
Özgül Yakıt Tüketimi (g/kWh)	278	283	274	287	286
Hava Tüketimi (mmSS)	39	40	40	39	45
Hava Tüketimi (kg/m ³)	20.73	20.99	20.99	20.73	22.27
Yağ Sıcaklığı (°C)	75	76	69	67	67
Egzoz Çıkış Sıcaklığı (°C)	545	529	534	502	535
Karbonmonoksit (CO), (ppm)	2143	1628	1925	1458	793
Karbondioksit (CO ₂), (%)	6.54	5.71	5.62	5.65	5.33
Oksijen (O ₂), (%)	11.6	12.3	13.1	13.4	13.9
Azot Oksitler (NO _x), (ppm)	1048	1020	987	936	925
Azotdioksit (NO ₂), (mg/Nm ³)	1672	1736	1890	1971	2024
Yanma Verimi (%)	90.5	90.0	89.4	93.9	90.9
Hava Fazlalık Katsayısı	2.78	2.73	2.78	3.43	2.97

Enjeksiyon basıncı = 175 bar

Motor devri = 2200 d/d

Yakıt Cinsi	100D	50PE50D	50AE50D	100PE	100AE
Moment (Nm)	19.75	19.50	19.25	19.00	18.50
Güç (kW)	4.55	4.49	4.43	4.37	4.31
Yakıt Tüketimi (g/dak)	21.3	21.5	21.2	21.6	21.8
Yakıt Tüketimi (kg/h)	1.26	1.29	1.21	1.29	1.20
Özgül Yakıt Tüketimi (g/kWh)	276	280	261	276	278
Hava Tüketimi (mmSS)	30	30	30	28	32
Hava Tüketimi (kg/m ³)	18.18	18.18	18.18	17.56	18.78
Yağ Sıcaklığı (°C)	76	78	72	70	68
Egzoz Çıkış Sıcaklığı (°C)	523	505	519	506	515
Karbonmonoksit (CO), (ppm)	2489	2199	2123	1590	898
Karbondioksit (CO ₂), (%)	6.64	6.19	5.75	5.85	5.49
Oksijen (O ₂), (%)	11.3	11.8	12.2	12.8	13.2
Azot Oksitler (NO _x), (ppm)	1120	1101	1080	1035	1008
Azotdioksit (NO ₂), (mg/Nm ³)	1872	2001	1956	2165	2165
Yanma Verimi (%)	90.1	90.2	89.5	94.9	90.4
Hava Fazlalık Katsayısı	1.92	2.28	2.58	3.34	2.83

Enjeksiyon basıncı = 175 bar

Motor devri = 1900 d/d

Yakıt Cinsi	100D	50PE50D	50AE50D	100PE	100AE
Moment (Nm)	19.25	19.75	18.25	19.50	17.75
Güç (kW)	3.83	3.92	3.63	3.87	3.53
Yakıt Tüketimi (g/dak)	18.2	19.0	18.8	18.4	19.0
Yakıt Tüketimi (kg/h)	1.09	1.14	1.01	1.10	1.14
Özgül Yakıt Tüketimi (g/kWh)	284	292	270	292	286
Hava Tüketimi (mmSS)	20	19	20	22	24
Hava Tüketimi (kg/m ³)	14.84	14.47	14.84	15.57	16.26
Yağ Sıcaklığı (°C)	78	79	74	72	72
Egzoz Çıkış Sıcaklığı (°C)	527	508	514	480	406
Karbonmonoksit (CO), (ppm)	2868	2660	2570	2120	1423
Karbondioksit (CO ₂), (%)	6.38	6.07	5.60	5.52	4.92
Oksijen (O ₂), (%)	11.2	11.8	12.2	12.7	13.3
Azot Oksitler (NO _x), (ppm)	1124	1080	1037	968	908
Azotdioksit (NO ₂), (mg/Nm ³)	1987	2151	2175	2316	2371
Yanma Verimi (%)	91.2	91.8	90.5	95.0	89.8
Hava Fazlalık Katsayısı	1.67	1.89	2.20	3.42	2.92

Enjeksiyon basıncı = 175 bar
Motor devri = 1600 d/d

Yakıt Cinsi	100D	50PE50D	50AE50D	100PE	100AE
Moment (Nm)	18.25	18.50	17.50	18.50	16.75
Güç (kW)	3.05	3.09	2.93	3.09	2.80
Yakıt Tüketimi (g/dak)	14.5	15.3	14.8	15.6	14.8
Yakıt Tüketimi (kg/h)	0.87	0.92	0.87	0.93	0.86
Özgül Yakıt Tüketimi (g/kWh)	286	297	292	307	293
Hava Tüketimi (mmSS)	14	12	15	16	15
Hava Tüketimi (kg/m ³)	12.42	11.50	12.85	13.68	12.85
Yağ Sıcaklığı (°C)	79	80	79	80	75
Egzoz Çıkış Sıcaklığı (°C)	509	493	495	451	384
Karbonmonoksit (CO), (ppm)	3580	3560	3410	2780	1552
Karbondioksit (CO ₂), (%)	6.22	5.87	5.68	5.24	4.80
Oksijen (O ₂), (%)	11.9	12.5	13.0	13.6	14.1
Azot Oksitler (NO _x), (ppm)	1035	987	969	885	852
Azotdioksit (NO ₂), (mg/Nm ³)	1888	2041	1988	2166	1947
Yanma Verimi (%)	92.2	92.0	91.7	95.2	94.8
Hava Fazlalık Katsayısı	1.86	2.20	2.63	3.18	2.87

Enjeksiyon basıncı = 175 bar
Motor devri = 1300 d/d

Yakıt Cinsi	100D	50PE50D	50AE50D	100PE	100AE
Moment (Nm)	15.75	15.50	16.00	16.00	15.25
Güç (kW)	2.14	2.11	2.17	2.17	2.07
Yakıt Tüketimi (g/dak)	10.6	10.7	10.8	11.6	11.4
Yakıt Tüketimi (kg/h)	0.64	0.64	0.65	0.67	0.66
Özgül Yakıt Tüketimi (g/kWh)	299	303	308	313	318
Hava Tüketimi (mmSS)	12	10	11	12	12
Hava Tüketimi (kg/m ³)	11.50	10.49	11.30	11.50	11.50
Yağ Sıcaklığı (°C)	81	83	81	81	77
Egzoz Çıkış Sıcaklığı (°C)	482	445	456	431	369
Karbonmonoksit (CO), (ppm)	3912	3814	3680	2960	2212
Karbondioksit (CO ₂), (%)	5.25	4.80	4.64	4.27	4.01
Oksijen (O ₂), (%)	13.4	14.0	14.6	14.6	15.3
Azot Oksitler (NO _x), (ppm)	773	717	751	640	582
Azotdioksit (NO ₂), (mg/Nm ³)	1689	1730	1889	1973	1926
Yanma Verimi (%)	92.7	92.2	91.9	95.1	94.9
Hava Fazlalık Katsayısı	2.31	2.63	2.55	3.14	3.86

Enjeksiyon basıncı = 200 bar
Motor devri = 3100 d/d

Yakıt Cinsi	100D	50PE50D	50AE50D	100PE	100AE
Moment (Nm)	17.00	16.50	16.25	16.00	15.75
Güç (kW)	5.51	5.35	5.27	5.19	5.03
Yakıt Tüketimi (g/dak)	27.5	28.2	28.0	28.6	28.5
Yakıt Tüketimi (kg/h)	1.65	1.69	1.56	1.71	1.71
Özgül Yakıt Tüketimi (g/kWh)	302	315	307	329	334
Hava Tüketimi (mmSS)	68	76	67	69	76
Hava Tüketimi (kg/m ³)	25.28	28.94	27.17	27.57	28.94
Yağ Sıcaklığı (°C)	60	62	64	67	67
Egzoz Çıkış Sıcaklığı (°C)	456	432	418	422	432
Karbonmonoksit (CO), (ppm)	1292	1213	1213	374	456
Karbondioksit (CO ₂), (%)	9.38	9.80	8.90	7.70	6.86
Oksijen (O ₂), (%)	806	10.1	10.7	13.9	14.4
Azot Oksitler (NO _x), (ppm)	1275	1208	1120	1012	880
Azotdioksit (NO ₂), (mg/Nm ³)	2873	2072	1859	1717	2214
Yanma Verimi (%)	90.4	90.3	89.9	89.5	92.9
Hava Fazlalık Katsayısı	2.39	2.62	3.25	4.53	4.02

Enjeksiyon basıncı = 200 bar
Motor devri = 2800 d/d

Yakıt Cinsi	100D	50PE50D	50AE50D	100PE	100AE
Moment (Nm)	18.00	17.50	17.25	18.25	14.75
Güç (kW)	5.27	5.13	5.05	5.25	4.32
Yakıt Tüketimi (g/dak)	25.6	25.8	25.7	26.0	26.2
Yakıt Tüketimi (kg/h)	1.54	1.53	1.47	1.48	1.57
Özgül Yakıt Tüketimi (g/kWh)	294	295	296	312	320
Hava Tüketimi (mmSS)	50	65	54	52	75
Hava Tüketimi (kg/m ³)	23.47	26.77	24.39	23.94	28.75
Yağ Sıcaklığı (°C)	62	66	66	68	72
Egzoz Çıkış Sıcaklığı (°C)	630	621	545	534	440
Karbonmonoksit (CO), (ppm)	2437	1962	1742	556	644
Karbondioksit (CO ₂), (%)	10.31	9.60	8.96	7.79	6.96
Oksijen (O ₂), (%)	5.5	6.6	8.1	10.7	12.1
Azot Oksitler (NO _x), (ppm)	1440	1321	1258	1120	1075
Azotdioksit (NO ₂), (mg/Nm ³)	2194	2187	2683	2464	2317
Yanma Verimi (%)	92.2	89.2	91.7	90.5	92.2
Hava Fazlalık Katsayısı	1.53	2.04	1.85	3.83	2.83

Enjeksiyon basıncı = 200 bar
Motor devri = 2500 d/d

Yakıt Cinsi	100D	50PE50D	50AE50D	100PE	100AE
Moment (Nm)	18.25	18.00	17.50	18.75	16.25
Güç (kW)	4.77	4.71	4.58	4.90	4.32
Yakıt Tüketimi (g/dak)	23.0	22.8	23.4	24.0	23.4
Yakıt Tüketimi (kg/h)	1.38	1.37	1.34	1.44	1.41
Özgül Yakıt Tüketimi (g/kWh)	283	291	288	305	312
Hava Tüketimi (mmSS)	37	45	37	38	47
Hava Tüketimi (kg/m ³)	17.25	22.27	17.25	20.46	28.55
Yağ Sıcaklığı (°C)	64	73	67	69	75
Egzoz Çıkış Sıcaklığı (°C)	568	555	590	502	472
Karbonmonoksit (CO), (ppm)	2740	2314	2346	1284	755
Karbondioksit (CO ₂), (%)	10.51	9.82	9.08	8.17	7.52
Oksijen (O ₂), (%)	5.1	6.4	7.8	8.6	11.2
Azot Oksitler (NO _x), (ppm)	1464	1341	1378	1267	1214
Azotdioksit (NO ₂), (mg/Nm ³)	3005	2118	2829	2253	3439
Yanma Verimi (%)	94.1	89.4	91.6	90.1	94.5
Hava Fazlalık Katsayısı	1.09	1.44	1.69	3.38	2.17

Enjeksiyon basıncı = 200 bar
Motor devri = 2200 d/d

Yakıt Cinsi	100D	50PE50D	50AE50D	100PE	100AE
Moment (Nm)	20.00	19.75	19.50	19.50	18.75
Güç (kW)	4.60	4.55	4.49	4.49	4.31
Yakıt Tüketimi (g/dak)	21.8	21.9	21.9	22.0	22.0
Yakıt Tüketimi (kg/h)	1.31	1.30	1.29	1.33	1.32
Özgül Yakıt Tüketimi (g/kWh)	284	285	287	302	308
Hava Tüketimi (mmSS)	24	30	28	27	28
Hava Tüketimi (kg/m ³)	16.26	18.18	17.56	17.25	17.56
Yağ Sıcaklığı (°C)	67	76	73	72	77
Egzoz Çıkış Sıcaklığı (°C)	522	594	582	490	461
Karbonmonoksit (CO), (ppm)	3244	2842	2581	1623	1142
Karbondioksit (CO ₂), (%)	11.08	10.04	9.42	8.23	7.34
Oksijen (O ₂), (%)	4.8	6.2	6.5	8.3	9.4
Azot Oksitler (NO _x), (ppm)	1492	1400	1331	1280	1219
Azotdioksit (NO ₂), (mg/Nm ³)	3001	2845	2993	2524	3542
Yanma Verimi (%)	93.3	90.5	91.4	89.9	90.0
Hava Fazlalık Katsayısı	1.34	1.11	1.62	2.94	2.55

Enjeksiyon basıncı = 200 bar
Motor devri = 1900 d/d

Yakıt Cinsi	100D	50PE50D	50AE50D	100PE	100AE
Moment (Nm)	18.75	18.50	16.75	18.50	16.75
Güç (kW)	3.73	3.68	3.33	3.68	3.23
Yakıt Tüketimi (g/dak)	18.0	18.2	18.1	18.4	18.6
Yakıt Tüketimi (kg/h)	1.08	1.07	1.08	1.09	1.11
Özgül Yakıt Tüketimi (g/kWh)	291	293	301	298	303
Hava Tüketimi (mmSS)	18	16	16	22	24
Hava Tüketimi (kg/m ³)	14.08	13.28	14.47	15.57	17.87
Yağ Sıcaklığı (°C)	71	77	75	74	78
Egzoz Çıkış Sıcaklığı (°C)	489	554	538	411	432
Karbonmonoksit (CO), (ppm)	3523	2945	3115	2117	1635
Karbondioksit (CO ₂), (%)	10.4	9.50	8.15	7.56	7.15
Oksijen (O ₂), (%)	5.5	6.8	7.9	8.4	9.5
Azot Oksitler (NO _x), (ppm)	1406	1383	1320	1260	1160
Azotdioksit (NO ₂), (mg/Nm ³)	3016	2851	2847	2502	3492
Yanma Verimi (%)	95.4	90.8	91.2	89.7	95.6
Hava Fazlalık Katsayısı	1.37	1.25	1.57	2.11	1.82

Enjeksiyon basıncı = 200 bar
Motor devri = 1600 d/d

Yakıt Cinsi	100D	50PE50D	50AE50D	100PE	100AE
Moment (Nm)	17.75	17.25	16.50	16.75	14.75
Güç (kW)	2.97	2.89	2.76	2.80	2.38
Yakıt Tüketimi (g/dak)	14.8	15.0	14.8	15.0	15.2
Yakıt Tüketimi (kg/h)	0.89	0.86	0.89	0.86	0.91
Özgül Yakıt Tüketimi (g/kWh)	291	301	302	307	334
Hava Tüketimi (mmSS)	14	12	12	16	17
Hava Tüketimi (kg/m ³)	13.68	11.50	11.50	13.28	13.85
Yağ Sıcaklığı (°C)	75	78	79	75	80
Egzoz Çıkış Sıcaklığı (°C)	484	525	505	403	430
Karbonmonoksit (CO), (ppm)	3779	3410	3254	2473	1876
Karbondioksit (CO ₂), (%)	8.83	8.26	7.94	7.16	6.26
Oksijen (O ₂), (%)	6.1	7.3	7.8	8.6	8.9
Azot Oksitler (NO _x), (ppm)	1331	1282	1183	1086	1042
Azotdioksit (NO ₂), (mg/Nm ³)	2948	2859	2892	2233	3321
Yanma Verimi (%)	94.2	91.2	91.8	93.9	95.7
Hava Fazlalık Katsayısı	1.61	1.47	1.24	2.07	1.86

Enjeksiyon basıncı = 200 bar

Motor devri = 1300 d/d

Yakıt Cinsi	100D	50PE50D	50AE50D	100PE	100AE
Moment (Nm)	16.50	16.25	14.75	15.25	13.50
Güç (kW)	2.24	2.21	2.00	2.07	1.83
Yakıt Tüketimi (g/dak)	11.4	11.6	11.6	12.0	12.0
Yakıt Tüketimi (kg/h)	0.67	0.68	0.68	0.69	0.72
Özgül Yakıt Tüketimi (g/kWh)	307	309	311	313	360
Hava Tüketimi (mmSS)	12	11	11	13	13
Hava Tüketimi (kg/m ³)	11.50	11.01	11.01	11.97	11.97
Yağ Sıcaklığı (°C)	78	80	81	78	81
Egzoz Çıkış Sıcaklığı (°C)	390	495	480	394	415
Karbonmonoksit (CO), (ppm)	3912	3556	3713	2542	2157
Karbondioksit (CO ₂), (%)	6.87	5.83	6.20	5.28	4.58
Oksijen (O ₂), (%)	8.1	8.8	9.3	10.1	11.1
Azot Oksitler (NO _x), (ppm)	1069	967	992	909	867
Azotdioksit (NO ₂), (mg/Nm ³)	2194	2032	2443	1870	2192
Yanma Verimi (%)	96.6	91.7	91.9	93.9	94.5
Hava Fazlalık Katsayısı	1.50	2.13	1.83	2.43	1.98

Enjeksiyon basıncı = 225 bar

Motor devri = 3100 d/d

Yakıt Cinsi	100D	50PE50D	50AE50D	100PE	100AE
Moment (Nm)	16.25	15.75	15.50	15.25	14.75
Güç (kW)	5.27	5.11	5.03	4.95	4.78
Yakıt Tüketimi (g/dak)	27.4	27.8	28.0	29.0	29.2
Yakıt Tüketimi (kg/h)	1.64	1.69	1.70	1.75	1.76
Özgül Yakıt Tüketimi (g/kWh)	311	330	333	351	341
Hava Tüketimi (mmSS)	61	66	66	69	64
Hava Tüketimi (kg/m ³)	25.93	26.97	26.97	27.57	26.56
Yağ Sıcaklığı (°C)	63	64	59	65	63
Egzoz Çıkış Sıcaklığı (°C)	643	533	497	528	445
Karbonmonoksit (CO), (ppm)	1313	1069	739	256	279
Karbondioksit (CO ₂), (%)	8.27	7.96	7.03	6.12	5.44
Oksijen (O ₂), (%)	11.3	12.4	13.4	14.2	15.8
Azot Oksitler (NO _x), (ppm)	1472	1320	1371	1240	1109
Azotdioksit (NO ₂), (mg/Nm ³)	2943	2443	3329	2215	2391
Yanma Verimi (%)	88.2	90.6	86.4	89.7	92.4
Hava Fazlalık Katsayısı	2.24	3.28	4.38	4.93	4.13

Enjeksiyon basıncı = 225 bar

Motor devri = 2800 d/d

Yakıt Cinsi	100D	50PE50D	50AE50D	100PE	100AE
Moment (Nm)	17.50	15.75	14.75	17.25	14.75
Güç (kW)	5.13	4.61	4.32	4.95	4.18
Yakıt Tüketimi (g/dak)	24.4	24.6	25.6	26.6	26.4
Yakıt Tüketimi (kg/h)	1.46	1.48	1.53	1.60	1.57
Özgül Yakıt Tüketimi (g/kWh)	285	301	314	316	328
Hava Tüketimi (mmSS)	46	57	59	50	55
Hava Tüketimi (kg/m ³)	22.51	25.00	25.50	23.47	24.62
Yağ Sıcaklığı (°C)	65	67	60	68	68
Egzoz Çıkış Sıcaklığı (°C)	613	552	501	532	495
Karbonmonoksit (CO), (ppm)	2032	1342	1680	564	391
Karbondioksit (CO ₂), (%)	9.34	8.83	8.41	6.32	5.93
Oksijen (O ₂), (%)	8.9	10.5	11.2	11.8	13.6
Azot Oksitler (NO _x), (ppm)	1589	1505	1360	1280	1227
Azotdioksit (NO ₂), (mg/Nm ³)	2913	2543	3312	2376	2599
Yanma Verimi (%)	88.0	89.5	91.8	89.2	91.5
Hava Fazlalık Katsayısı	1.78	2.34	2.69	4.15	3.57

Enjeksiyon basıncı = 225 bar

Motor devri = 2500 d/d

Yakıt Cinsi	100D	50PE50D	50AE50D	100PE	100AE
Moment (Nm)	17.75	16.75	16.25	17.50	15.75
Güç (kW)	4.64	4.38	4.25	4.58	4.12
Yakıt Tüketimi (g/dak)	22.6	22.8	22.8	23.0	22.8
Yakıt Tüketimi (kg/h)	1.34	1.37	1.37	1.38	1.37
Özgül Yakıt Tüketimi (g/kWh)	288	312	310	315	317
Hava Tüketimi (mmSS)	37	43	53	37	45
Hava Tüketimi (kg/m ³)	20.19	21.77	24.16	20.19	22.27
Yağ Sıcaklığı (°C)	67	69	62	69	69
Egzoz Çıkış Sıcaklığı (°C)	564	563	488	469	463
Karbonmonoksit (CO), (ppm)	2354	1934	2116	773	598
Karbondioksit (CO ₂), (%)	9.54	8.89	8.21	6.72	6.12
Oksijen (O ₂), (%)	8.4	9.7	9.9	10.4	12.5
Azot Oksitler (NO _x), (ppm)	1632	1600	1355	1286	1240
Azotdioksit (NO ₂), (mg/Nm ³)	3111	2742	3278	2318	2382
Yanma Verimi (%)	87.2	89.2	92.1	86.8	90.6
Hava Fazlalık Katsayısı	1.66	1.86	1.88	3.57	3.28

Enjeksiyon basıncı = 225 bar

Motor devri = 2200 d/d

Yakıt Cinsi	100D	50PE50D	50AE50D	100PE	100AE
Moment (Nm)	18.50	18.25	17.75	17.50	17.00
Güç (kW)	4.26	4.20	4.08	4.03	3.91
Yakıt Tüketimi (g/dak)	19.5	19.8	19.6	20.0	20.0
Yakıt Tüketimi (kg/h)	1.17	1.19	1.17	1.20	1.20
Özgül Yakıt Tüketimi (g/kwh)	293	276	303	312	300
Hava Tüketimi (mmSS)	25	32	32	30	31
Hava Tüketimi (kg/m ³)	16.60	18.78	18.78	18.18	18.48
Yağ Sıcaklığı (°C)	70	72	64	71	71
Egzoz Çıkış Sıcaklığı (°C)	560	467	452	430	405
Karbonmonoksit (CO), (ppm)	2687	2173	2453	961	729
Karbondioksit (CO ₂), (%)	9.73	8.67	8.26	7.25	6.36
Oksijen (O ₂), (%)	7.1	7.5	8.8	10.4	13.2
Azot Oksitler (NO _x), (ppm)	1640	1497	1463	1337	1280
Azotdioksit (NO ₂), (mg/Nm ³)	3360	2992	3472	2412	2728
Yanma Verimi (%)	89.2	89.3	91.7	89.8	91.2
Hava Fazlalık Katsayısı	1.51	2.01	2.28	3.63	3.18

Enjeksiyon basıncı = 225 bar

Motor devri = 1900 d/d

Yakıt Cinsi	100D	50PE50D	50AE50D	100PE	100AE
Moment (Nm)	18.00	17.50	16.75	17.75	15.75
Güç (kW)	3.58	3.48	3.33	3.63	3.13
Yakıt Tüketimi (g/dak)	17.5	17.6	18.0	18.6	19.0
Yakıt Tüketimi (kg/h)	1.05	1.03	1.08	1.12	1.14
Özgül Yakıt Tüketimi (g/kWh)	308	295	309	326	321
Hava Tüketimi (mmSS)	24	24	26	22	28
Hava Tüketimi (kg/m ³)	16.26	16.26	16.92	15.57	17.56
Yağ Sıcaklığı (°C)	73	74	67	72	74
Egzoz Çıkış Sıcaklığı (°C)	539	487	441	440	436
Karbonmonoksit (CO), (ppm)	3142	2437	2763	1192	1076
Karbondioksit (CO ₂), (%)	9.42	8.12	7.89	6.15	5.33
Oksijen (O ₂), (%)	7.4	8.2	9.6	10.2	12.6
Azot Oksitler (NO _x), (ppm)	1543	1446	1421	1286	1101
Azotdioksit (NO ₂), (mg/Nm ³)	3167	2473	2872	2378	2340
Yanma Verimi (%)	89.8	89.9	92.7	91.8	91.8
Hava Fazlalık Katsayısı	1.24	2.06	1.85	3.89	3.32

Enjeksiyon basıncı = 225 bar
Motor devri = 1600 d/d

Yakıt Cinsi	100D	50PE50D	50AE50D	100PE	100AE
Moment (Nm)	16.25	15.50	15.25	16.50	14.75
Güç (kW)	2.72	2.59	2.55	2.76	2.47
Yakıt Tüketimi (g/dak)	14.0	14.2	14.6	15.2	15.0
Yakıt Tüketimi (kg/h)	0.83	0.85	0.84	0.91	0.90
Özgül Yakıt Tüketimi (g/kWh)	345	328	329	358	340
Hava Tüketimi (mmSS)	16	15	15	15	15
Hava Tüketimi (kg/m ³)	13.28	12.85	12.85	12.85	12.85
Yağ Sıcaklığı (°C)	74	77	69	75	77
Egzoz Çıkış Sıcaklığı (°C)	505	450	435	416	309
Karbonmonoksit (CO), (ppm)	3779	2536	2884	1261	1124
Karbondioksit (CO ₂), (%)	8.34	7.62	6.64	4.90	4.13
Oksijen (O ₂), (%)	7.6	8.3	9.7	11.2	14.3
Azot Oksitler (NO _x), (ppm)	1412	1236	1227	1168	1083
Azotdioksit (NO ₂), (mg/Nm ³)	2974	2482	2716	2384	2373
Yanma Verimi (%)	90.2	90.4	93.4	92.4	91.9
Hava Fazlalık Katsayısı	1.57	2.01	2.01	3.55	4.12

Enjeksiyon basıncı = 225 bar
Motor devri = 1300 d/d

Yakıt Cinsi	100D	50PE50D	50AE50D	100PE	100AE
Moment (Nm)	14.75	13.75	13.00	14.50	12.75
Güç (kW)	2.00	1.87	1.76	1.97	1.73
Yakıt Tüketimi (g/dak)	11.5	11.7	11.8	12.0	11.8
Yakıt Tüketimi (kg/h)	0.69	0.70	0.71	0.72	0.71
Özgül Yakıt Tüketimi (g/kWh)	345	355	338	360	404
Hava Tüketimi (mmSS)	12	12	13	12	13
Hava Tüketimi (kg/m ³)	11.50	11.50	11.97	11.50	11.97
Yağ Sıcaklığı (°C)	78	29	73	76	79
Egzoz Çıkış Sıcaklığı (°C)	480	420	426	394	304
Karbonmonoksit (CO), (ppm)	3912	2763	3129	1374	1423
Karbondioksit (CO ₂), (%)	6.00	5.53	5.01	4.19	3.69
Oksijen (O ₂), (%)	10.1	12.1	11.2	13.9	16.6
Azot Oksitler (NO _x), (ppm)	1101	1018	985	920	883
Azotdioksit (NO ₂), (mg/Nm ³)	2351	1952	1942	1719	1825
Yanma Verimi (%)	90.4	90.7	93.5	91.6	91.9
Hava Fazlalık Katsayısı	1.62	2.07	2.04	3.73	4.42

Enjeksiyon basıncı = 250 bar
Motor devri = 3100 d/d

Yakıt Cinsi	100D	50PE50D	50AE50D	100PE	100AE
Moment (Nm)	16.25	15.50	15.25	14.75	14.50
Güç (kW)	5.27	5.03	4.95	4.78	4.71
Yakıt Tüketimi (g/dak)	26.0	26.8	26.9	27.2	27.5
Yakıt Tüketimi (kg/h)	1.60	1.61	1.61	1.65	1.65
Özgül Yakıt Tüketimi (g/kWh)	305	320	325	341	350
Hava Tüketimi (mmSS)	77	69	66	68	76
Hava Tüketimi (kg/m ³)	29.13	27.57	26.97	27.37	28.94
Yağ Sıcaklığı (°C)	63	63	62	58	61
Egzoz Çıkış Sıcaklığı (°C)	405	585	581	521	430
Karbonmonoksit (CO), (ppm)	850	610	1059	293	259
Karbondioksit (CO ₂), (%)	6.80	7.21	6.51	5.60	4.37
Oksijen (O ₂), (%)	11.9	13.6	15.6	17.2	17.8
Azot Oksitler (NO _x), (ppm)	1299	1209	1053	1160	920
Azotdioksit (NO ₂), (mg/Nm ³)	1224	2556	3485	2415	2121
Yanma Verimi (%)	84.7	90.0	90.5	88.5	86.7
Hava Fazlalık Katsayısı	3.15	3.42	4.93	5.91	5.27

Enjeksiyon basıncı = 250 bar
Motor devri = 2800 d/d

Yakıt Cinsi	100D	50PE50D	50AE50D	100PE	100AE
Moment (Nm)	17.25	17.00	17.50	17.50	15.75
Güç (kW)	5.05	4.98	5.13	5.12	4.47
Yakıt Tüketimi (g/dak)	24.5	25.8	25.5	26.1	26.5
Yakıt Tüketimi (kg/h)	1.47	1.51	1.53	1.56	1.59
Özgül Yakıt Tüketimi (g/kWh)	293	303	313	317	344
Hava Tüketimi (mmSS)	57	55	50	50	60
Hava Tüketimi (kg/m ³)	25.06	24.62	23.47	23.47	25.71
Yağ Sıcaklığı (°C)	66	66	65	59	65
Egzoz Çıkış Sıcaklığı (°C)	522	590	592	492	5.8
Karbonmonoksit (CO), (ppm)	1274	980	1185	610	397
Karbondioksit (CO ₂), (%)	7.60	7.08	6.51	5.68	5.29
Oksijen (O ₂), (%)	10.9	11.5	14.2	15.4	17.1
Azot Oksitler (NO _x), (ppm)	1308	1349	1275	1176	1080
Azotdioksit (NO ₂), (mg/Nm ³)	1183	2769	3524	2457	2213
Yanma Verimi (%)	88.0	89.0	90.0	90.6	89.4
Hava Fazlalık Katsayısı	2.45	2.81	3.12	4.90	4.18

Enjeksiyon basıncı = 250 bar
Motor devri = 2500 d/d

Yakıt Cinsi	100D	50PE50D	50AE50D	100PE	100AE
Moment (Nm)	17.50	17.25	17.75	17.75	16.25
Güç (kW)	4.58	4.51	4.64	4.64	4.15
Yakıt Tüketimi (g/dak)	22.6	22.9	23.2	23.5	23.7
Yakıt Tüketimi (kg/h)	1.35	1.37	1.39	1.41	1.42
Özgül Yakıt Tüketimi (g/kWh)	298	296	299	314	334
Hava Tüketimi (mmSS)	46	44	42	39	45
Hava Tüketimi (kg/m ³)	22.51	22.02	21.51	20.73	22.27
Yağ Sıcaklığı (°C)	68	67	68	60	71
Egzoz Çıkış Sıcaklığı (°C)	538	532	535	437	508
Karbonmonoksit (CO), (ppm)	1547	1210	1434	1042	592
Karbondioksit (CO ₂), (%)	7.78	7.24	7.60	5.91	5.47
Oksijen (O ₂), (%)	10.3	10.9	12.8	14.4	15.1
Azot Oksitler (NO _x), (ppm)	1373	1423	1267	1086	1021
Azotdioksit (NO ₂), (mg/Nm ³)	2428	2764	2718	2666	2381
Yanma Verimi (%)	88.2	88.9	89.2	92.4	88.2
Hava Fazlalık Katsayısı	2.12	2.12	3.09	3.55	3.62

Enjeksiyon basıncı = 250 bar
Motor devri = 2200 d/d

Yakıt Cinsi	100D	50PE50D	50AE50D	100PE	100AE
Moment (Nm)	18.25	18.00	17.75	17.00	16.25
Güç (kW)	4.20	4.14	4.08	3.91	3.74
Yakıt Tüketimi (g/dak)	19.8	19.9	20.2	20.0	19.6
Yakıt Tüketimi (kg/h)	1.18	1.19	1.22	1.20	1.15
Özgül Yakıt Tüketimi (g/kWh)	285	288	302	296	302
Hava Tüketimi (mmSS)	32	35	30	30	35
Hava Tüketimi (kg/m ³)	18.78	19.07	18.18	18.18	19.64
Yağ Sıcaklığı (°C)	69	69	72	62	74
Egzoz Çıkış Sıcaklığı (°C)	511	507	522	440	435
Karbonmonoksit (CO), (ppm)	1830	1310	1562	1120	780
Karbondioksit (CO ₂), (%)	7.88	7.42	7.26	6.15	5.56
Oksijen (O ₂), (%)	10.2	10.7	12.0	14.1	14.5
Azot Oksitler (NO _x), (ppm)	1360	1280	1185	1135	1012
Azotdioksit (NO ₂), (mg/Nm ³)	2569	2812	2793	2626	2193
Yanma Verimi (%)	88.4	89.2	89.6	94.3	89.1
Hava Fazlalık Katsayısı	2.06	2.18	3.01	3.23	3.55

Enjeksiyon basıncı = 250 bar

Motor devri = 1900 d/d

Yakıt Cinsi	100D	50PE50D	50AE50D	100PE	100AE
Moment (Nm)	17.75	16.75	16.50	17.50	15.75
Güç (kW)	3.53	3.33	3.28	3.68	3.23
Yakıt Tüketimi (g/dak)	16.8	17.0	17.4	18.6	18.4
Yakıt Tüketimi (kg/h)	1.01	1.02	1.05	1.14	1.10
Özgül Yakıt Tüketimi (g/kWh)	288	297	320	312	318
Hava Tüketimi (mmSS)	23	21	18	23	25
Hava Tüketimi (kg/m ³)	15.92	15.57	14.08	15.92	16.60
Yağ Sıcaklığı (°C)	70	72	74	65	75
Egzoz Çıkış Sıcaklığı (°C)	494	487	488	427	400
Karbonmonoksit (CO), (ppm)	2176	1470	1960	1042	889
Karbondioksit (CO ₂), (%)	7.82	7.57	6.93	5.72	4.90
Oksijen (O ₂), (%)	10.7	11.3	12.8	13.5	14.4
Azot Oksitler (NO _x), (ppm)	1275	1212	1123	1021	955
Azotdioksit (NO ₂), (mg/Nm ³)	2307	2753	2693	2580	2241
Yanma Verimi (%)	89.7	89.4	90.2	95.5	93.2
Hava Fazlalık Katsayısı	2.04	2.28	2.88	3.69	3.11

Enjeksiyon basıncı = 250 bar

Motor devri = 1600 d/d

Yakıt Cinsi	100D	50PE50D	50AE50D	100PE	100AE
Moment (Nm)	16.25	15.50	14.75	16.75	13.75
Güç (kW)	2.72	2.59	2.47	2.80	2.26
Yakıt Tüketimi (g/dak)	13.6	14.0	14.0	15.2	15.0
Yakıt Tüketimi (kg/h)	0.82	0.84	0.84	0.91	0.90
Özgül Yakıt Tüketimi (g/kWh)	304	307	313	320	319
Hava Tüketimi (mmSS)	15	14	14	17	18
Hava Tüketimi (kg/m ³)	12.85	12.42	12.42	13.68	14.08
Yağ Sıcaklığı (°C)	73	74	76	72	77
Egzoz Çıkış Sıcaklığı (°C)	463	446	444	372	375
Karbonmonoksit (CO), (ppm)	2624	1780	2215	1293	1025
Karbondioksit (CO ₂), (%)	7.39	6.83	6.06	5.25	4.79
Oksijen (O ₂), (%)	11.2	11.5	13.5	14.2	14.6
Azot Oksitler (NO _x), (ppm)	1173	1094	1012	939	889
Azotdioksit (NO ₂), (mg/Nm ³)	2408	2701	2498	2210	2010
Yanma Verimi (%)	90.6	89.8	90.9	95.6	93.8
Hava Fazlalık Katsayısı	2.15	2.21	2.83	3.23	3.12

Enjeksiyon basıncı = 250 bar

Motor devri = 1300 d/d

Yakıt Cinsi	100D	50PE50D	50AE50D	100PE	100AE
Moment (Nm)	14.50	14.25	12.75	14.25	11.50
Güç (kW)	1.97	1.93	1.85	2.04	1.86
Yakıt Tüketimi (g/dak)	11.0	11.4	11.2	12.0	12.2
Yakıt Tüketimi (kg/h)	0.66	0.68	0.67	0.72	0.73
Özgül Yakıt Tüketimi (g/kWh)	335	342	354	354	358
Hava Tüketimi (mmSS)	11	12	12	13	13
Hava Tüketimi (kg/m ³)	11.01	11.50	11.50	11.97	11.97
Yağ Sıcaklığı (°C)	75	75	77	73	80
Egzoz Çıkış Sıcaklığı (°C)	422	425	406	356	342
Karbonmonoksit (CO), (ppm)	2650	1821	2180	1324	1096
Karbondioksit (CO ₂), (%)	6.04	5.68	5.45	4.61	4.21
Oksijen (O ₂), (%)	11.8	12.5	13.6	14.4	15.1
Azot Oksitler (NO _x), (ppm)	889	996	848	769	725
Azotdioksit (NO ₂), (mg/Nm ³)	1817	2041	1947	1846	1707
Yanma Verimi (%)	90.8	89.9	90.8	95.6	93.7
Hava Fazlalık Katsayısı	2.28	2.68	2.91	3.40	3.18

