

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ÖRNEK DİZEL MOTORDA MOTORİN VE KANOLA  
YAĞINDAN ELDE EDİLMİŞ BİYODİZEL İÇİN EGR  
STRATEJİLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI**

Makine Mühendisi Aydın TOPCU

**FBE Makine Mühendisliği Anabilim Dalı Enerji Makinaları Programında  
Hazırlanan**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Tez Danışmanı : Yrd. Doç Dr. Muammer ÖZKAN**

**İSTANBUL, 2008**

# İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ .....	iv
KISALTIMA LİSTESİ .....	v
ŞEKİL LİSTESİ .....	vi
ÇİZELGE LİSTESİ .....	x
ÖNSÖZ .....	xi
ÖZET .....	xii
ABSTRACT .....	xiii
1. GİRİŞ .....	1
2. BİTKİSEL YAĞLAR VE BİYODİZEL .....	4
2.1 Bitkisel Yağlar .....	4
2.2 Biyodizel .....	8
2.2.1 Enerji içeriği .....	10
2.2.2 Viskozite .....	10
2.2.3 Setan sayısı .....	10
2.2.4 Soğuk hava özellikleri .....	11
2.2.5 Parlama noktası .....	11
2.2.6 Depolama emniyeti .....	11
2.2.7 Biyolojik bozunabilirlik özellikleri .....	11
2.2.8 Zehirleyicilik .....	11
2.2.9 CO <sub>2</sub> salımı .....	11
3. DİZEL MOTORLARINDA EGZOZ EMİSYONLARI .....	13
3.1 CO <sub>2</sub> Oluşumu ve Kontrolü .....	13
3.2 CO Oluşumu ve Kontrolü .....	13
3.3 Yanmamış Hidrokarbonların Oluşumu ve Kontrolü .....	14
3.4 Partikül Madde Emisyonlarının Oluşumu ve Kontrolü .....	15
3.5 NO <sub>x</sub> Oluşumu ve Kontrolü .....	17
4. EGZOZ GAZI GERİ DOLAŞIMI .....	21
4.1 EGR Sistemleri .....	21
4.2 EGR Oranı .....	23
5. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI .....	25
6. KULLANILAN YÖNTEM VE MATERYALLER .....	34

6.1	Yöntem .....	34
6.2	Materyal.....	37
6.2.1	Yakıtlar .....	37
6.2.2	Motor ve yükleme seti .....	38
6.2.3	Ölçüm cihazları.....	40
7.	DENEY SONUÇLARI.....	42
7.1	Performans Grafikleri .....	43
7.2	NO <sub>x</sub> Emisyon Grafikleri.....	52
7.3	CO Emisyon Grafikleri.....	59
7.4	HC Emisyon Grafikleri.....	66
7.5	İs Emisyon Grafikleri .....	73
7.6	Kirletici Harici Gaz Grafikleri.....	80
7.7	Karşılaştırmalı Grafikler ve Analiz .....	87
	SONUÇLAR VE ÖNERİLER .....	103
	KAYNAKLAR.....	105
	ÖZGEÇMİŞ.....	108

## SİMGE LİSTESİ

$b_e$	Özgül yakıt tüketimi
$k$	Absorplama katsayısı
$\lambda$	Lambda hava fazlalık katsayısı
$m_a$	Toplam taze hava kütlesi
$m_{egr}$	Geri dolaştırılan egzoz gazı kütlesi
$m_f$	Toplam yakıt kütlesi
$m_i$	Toplam taze dolgu kütlesi

## KISALTMA LİSTESİ

ASTM	Amerikan Test ve Malzemeleri Birliği
BSFC	Fren Özgöl Yakıt Tüketimi
CO	Karbonmonoksit
CO <sub>2</sub>	Karbondioksit
EGR	Egzoz Gazı Geri Dolaşımı ( <i>Exhaust Gas Recirculation</i> )
EN	Avrupa Standardı ( <i>Euro Norm</i> )
HC	Hidrokarbonlar
HFK	Hava Fazlalık Katsayısı
KMA	Krank Mili Açısı
NO <sub>x</sub>	Azotoksitler
O <sub>2</sub>	Oksijen
PAH	Polisiklik Aromatik Hidrokarbonlar
PM	Partikül Madde
SMD	Sauter Ortalama Çapı ( <i>Sauter Mean Diameter</i> )
ULSD	Çok Düşük Kükürtlü Dizel Yakıtı ( <i>Ultra Low Sulphur Diesel</i> )

## ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1.1 Dünya petrol rezervlerinin değişimi (1899 - 2006) [1] .....	1
Şekil 1.2 Dünya Ham Petrol Fiyatlarının Son 20 Senedeki Değişimi [2] .....	2
Şekil 2.1 Trigliseritlerin yapısı (Agarwal, 2007).....	4
Şekil 2.2 Bitkisel Yağların Viskozitelerini Azaltma Yöntemleri (Ulusoy vd., 2002).....	7
Şekil 2.3 Transesterifikasyon işlemi (Çanakçı vd., 2005).....	8
Şekil 3.1 Ham egzoz gaz kompozisyonları: a) Otto b) Dizel (Merker vd., 2006).....	13
Şekil 3.2 Dizel motorlarda partikül madde kompozisyonu (Merker vd., 2006).....	15
Şekil 3.3 Termal reaktörde NO oluşumu ve parçalanması.....	18
Şekil 3.4 NO <sub>x</sub> emisyonlarını kontrol etmeye yarayan yöntemler (Haşimoğlu vd., 2002).....	19
Şekil 4.1 Egzoz gazı geri dolaşımı (Zheng vd., 2004) .....	21
Şekil 4.2 Düşük basınç EGR çevrimi (Zheng vd., 2004) .....	22
Şekil 4.3 Yüksek basınç EGR çevrimi (Zheng vd., 2004) .....	23
Şekil 5.1 Biyodizel karışımlarının EGR ile emisyon değişimleri (Tsolakis vd., 2007) .....	30
Şekil 6.1 Deney düzeneğinin genel şeması .....	34
Şekil 6.2 Cussons Technology P8600 test düzeneği, motoru ve yükleme seti.....	39
Şekil 6.3 Cussons Technology P8600 test düzeneği kontrol panosu .....	39
Şekil 6.4 AVL DiTEST DiCom 4000 emisyon analiz cihazı.....	40
Şekil 7.1 Güç ve moment değerlerinin devirlere göre değişimi (%0 EGR).....	43
Şekil 7.2 Güç ve moment değerlerinin devirlere göre değişimi (%5 EGR).....	43
Şekil 7.3 Güç ve moment değerlerinin devirlere göre değişimi (%10 EGR).....	44
Şekil 7.4 Güç ve moment değerlerinin devirlere göre değişimi (%15 EGR).....	44
Şekil 7.5 Güç ve moment değerlerinin devirlere göre değişimi (%20 EGR).....	45
Şekil 7.6 Bütün EGR oranlarına göre özgül yakıt tüketimi değişimi.....	46
Şekil 7.7 Bütün devirlere göre özgül yakıt tüketimi değişimi.....	48
Şekil 7.8 Bütün EGR oranlarına göre termik verim değişimi .....	49
Şekil 7.9 Bütün devirlere göre termik verim değişimi .....	51
Şekil 7.10 EGR oranlarının maksimum silindir basınçlarına etkisi .....	51
Şekil 7.11 NO <sub>x</sub> emisyonlarının EGR oranına göre değişimi (1000 d/d).....	52
Şekil 7.12 NO <sub>x</sub> emisyonlarının EGR oranına göre değişimi (1500 d/d).....	52
Şekil 7.13 NO <sub>x</sub> emisyonlarının EGR oranına göre değişimi (2000 d/d).....	53
Şekil 7.14 NO <sub>x</sub> emisyonlarının EGR oranına göre değişimi (2500 d/d).....	53
Şekil 7.15 NO <sub>x</sub> emisyonlarının EGR oranına göre değişimi (3000 d/d).....	54
Şekil 7.16 NO <sub>x</sub> emisyonlarının EGR oranına göre değişimi (3500 d/d).....	54

Şekil 7.17 HFK'ya bağlı NOx emisyonlarının değişimi (1000 d/d) .....	55
Şekil 7.18 HFK'ya bağlı NOx emisyonlarının değişimi (1500 d/d) .....	56
Şekil 7.19 HFK'ya bağlı NOx emisyonlarının değişimi (2000 d/d) .....	56
Şekil 7.20 HFK'ya bağlı NOx emisyonlarının değişimi (2500 d/d) .....	57
Şekil 7.21 HFK'ya bağlı NOx emisyonlarının değişimi (3000 d/d) .....	57
Şekil 7.22 HFK'ya bağlı NOx emisyonlarının değişimi (3500 d/d) .....	58
Şekil 7.23 CO emisyonlarının EGR oranına göre değişimi (1000 d/d).....	59
Şekil 7.24 CO emisyonlarının EGR oranına göre değişimi (1500 d/d).....	59
Şekil 7.25 CO emisyonlarının EGR oranına göre değişimi (2000 d/d).....	60
Şekil 7.26 CO emisyonlarının EGR oranına göre değişimi (2500 d/d).....	60
Şekil 7.27 CO emisyonlarının EGR oranına göre değişimi (3000 d/d).....	61
Şekil 7.28 CO emisyonlarının EGR oranına göre değişimi (3500 d/d).....	61
Şekil 7.29 HFK'ya bağlı CO emisyonlarının değişimi (1000 d/d) .....	62
Şekil 7.30 HFK'ya bağlı CO emisyonlarının değişimi (1500 d/d) .....	63
Şekil 7.31 HFK'ya bağlı CO emisyonlarının değişimi (2000 d/d) .....	63
Şekil 7.32 HFK'ya bağlı CO emisyonlarının değişimi (2500 d/d) .....	64
Şekil 7.33 HFK'ya bağlı CO emisyonlarının değişimi (3000 d/d) .....	64
Şekil 7.34 HFK'ya bağlı CO emisyonlarının değişimi (3500 d/d) .....	65
Şekil 7.35 HC emisyonlarının EGR oranına göre değişimi (1000 d/d).....	66
Şekil 7.36 HC emisyonlarının EGR oranına göre değişimi (1500 d/d).....	66
Şekil 7.37 HC emisyonlarının EGR oranına göre değişimi (2000 d/d).....	67
Şekil 7.38 HC emisyonlarının EGR oranına göre değişimi (2500 d/d).....	67
Şekil 7.39 HC emisyonlarının EGR oranına göre değişimi (3000 d/d).....	68
Şekil 7.40 HC emisyonlarının EGR oranına göre değişimi (3500 d/d).....	68
Şekil 7.41 HFK'ya bağlı HC emisyonlarının değişimi (1000 d/d) .....	69
Şekil 7.42 HFK'ya bağlı HC emisyonlarının değişimi (1500 d/d) .....	70
Şekil 7.43 HFK'ya bağlı HC emisyonlarının değişimi (2000 d/d) .....	70
Şekil 7.44 HFK'ya bağlı HC emisyonlarının değişimi (2500 d/d) .....	71
Şekil 7.45 HFK'ya bağlı HC emisyonlarının değişimi (3000 d/d) .....	71
Şekil 7.46 HFK'ya bağlı HC emisyonlarının değişimi (3500 d/d) .....	72
Şekil 7.47 İS emisyonlarının (k) EGR oranına göre değişimi (1000 d/d).....	73
Şekil 7.48 İS emisyonlarının (k) EGR oranına göre değişimi (1500 d/d).....	73
Şekil 7.49 İS emisyonlarının (k) EGR oranına göre değişimi (2000 d/d).....	74
Şekil 7.50 İS emisyonlarının (k) EGR oranına göre değişimi (2500 d/d).....	74

Şekil 7.51 İs emisyonlarının (k) EGR oranına göre değişimi (3000 d/d).....	75
Şekil 7.52 İs emisyonlarının (k) EGR oranına göre değişimi (3500 d/d).....	75
Şekil 7.53 HFK'ya göre absorplama katsayısının (k) değişimi (1000 d/d).....	76
Şekil 7.54 HFK'ya göre absorplama katsayısının (k) değişimi (1500 d/d).....	77
Şekil 7.55 HFK'ya göre absorplama katsayısının (k) değişimi (2000 d/d).....	77
Şekil 7.56 HFK'ya göre absorplama katsayısının (k) değişimi (2500 d/d).....	78
Şekil 7.57 HFK'ya göre absorplama katsayısının (k) değişimi (3000 d/d).....	78
Şekil 7.58 HFK'ya göre absorplama katsayısının (k) değişimi (3500 d/d).....	79
Şekil 7.59 Hava fazlalık katsayısının EGR oranına göre değişimi (1000 d/d).....	80
Şekil 7.60 Hava fazlalık katsayısının EGR oranına göre değişimi (1500 d/d).....	80
Şekil 7.61 Hava fazlalık katsayısının EGR oranına göre değişimi (2000 d/d).....	81
Şekil 7.62 Hava fazlalık katsayısının EGR oranına göre değişimi (2500 d/d).....	81
Şekil 7.63 Hava fazlalık katsayısının EGR oranına göre değişimi (3000 d/d).....	82
Şekil 7.64 Hava fazlalık katsayısının EGR oranına göre değişimi (3500 d/d).....	82
Şekil 7.65 CO <sub>2</sub> emisyonlarının EGR oranına göre değişimi (1000 d/d) .....	83
Şekil 7.66 CO <sub>2</sub> emisyonlarının EGR oranına göre değişimi (1500 d/d) .....	84
Şekil 7.67 CO <sub>2</sub> emisyonlarının EGR oranına göre değişimi (2000 d/d) .....	84
Şekil 7.68 CO <sub>2</sub> emisyonlarının EGR oranına göre değişimi (2500 d/d) .....	85
Şekil 7.69 CO <sub>2</sub> emisyonlarının EGR oranına göre değişimi (3000 d/d) .....	85
Şekil 7.70 CO <sub>2</sub> emisyonlarının EGR oranına göre değişimi (3500 d/d) .....	86
Şekil 7.71 EGR oranlarının motor gücüne etkisi (motorin) .....	87
Şekil 7.72 EGR oranlarının motor güce etkisi (kanola) .....	87
Şekil 7.73 Devirlere göre EGR oranlarının motor gücüne etkisi .....	88
Şekil 7.74 EGR oranlarının momente etkisi (motorin) .....	88
Şekil 7.75 EGR oranlarının momente etkisi (kanola).....	89
Şekil 7.76 Devirlere göre EGR oranlarının efektif güce etkisi .....	90
Şekil 7.77 Devirlere göre EGR oranlarının özgül yakıt tüketimine etkisi (motorin) .....	90
Şekil 7.78 Devirlere göre EGR oranlarının özgül yakıt tüketimine etkisi (kanola) .....	91
Şekil 7.79 Devirlere göre EGR oranlarının özgül yakıt tüketimine etkisi.....	91
Şekil 7.80 Devirlere göre EGR oranlarının NO <sub>x</sub> emisyonlarına etkisi (motorin).....	92
Şekil 7.81 Devirlere göre EGR oranlarının NO <sub>x</sub> emisyonlarına etkisi (kanola).....	92
Şekil 7.82 Devirlere göre EGR oranlarının CO emisyonlarına etkisi (motorin).....	93
Şekil 7.83 Devirlere göre EGR oranlarının CO emisyonlarına etkisi (kanola).....	94
Şekil 7.84 Devirlere göre EGR oranlarının HC emisyonlarına etkisi (motorin).....	95

Şekil 7.85 Devirlere göre EGR oranlarının HC emisyonlarına etkisi (kanola).....	95
Şekil 7.86 Devirlere göre EGR oranlarının is emisyonlarına etkisi (motorin).....	96
Şekil 7.87 Devirlere göre EGR oranlarının is emisyonlarına etkisi (kanola).....	97
Şekil 7.88 Devirlere göre EGR oranlarının is ve emisyonlara etkisi .....	98
Şekil 7.89 İs ve emisyonların yüzde olarak değişimi (1000 d/d) .....	99
Şekil 7.90 İs ve emisyonların yüzde olarak değişimi (1500 d/d) .....	99
Şekil 7.91 İs ve emisyonların yüzde olarak değişimi (2000 d/d) .....	100
Şekil 7.92 İs ve emisyonların yüzde olarak değişimi (2500 d/d) .....	100
Şekil 7.93 İs ve emisyonların yüzde olarak değişimi (3000 d/d) .....	101
Şekil 7.94 İs ve emisyonların yüzde olarak değişimi (3500 d/d) .....	101
Şekil 7.95 NOx emisyonlarının her iki yakıt için EGR oranı karşılaştırması .....	102

## ÇİZELGE LİSTESİ

Çizelge 2.1 Genel yağ asitlerinin kimyasal yapıları (Murugesan vd., 2008) .....	5
Çizelge 2.2 Bitkisel yağların kimyasal özellikleri (Agarwal, 2007) .....	5
Çizelge 2.3 Bitkisel yağların yakıt özellikleri (Murugesan vd., 2008) .....	6
Çizelge 2.4 Çeşitli bitkisel yağ metil esterlerinin yakıt özellikleri (Knothe vd., 2005) .....	12
Çizelge 6.1 Kanola biyodizel yakıtının analiz neticeleri .....	37
Çizelge 6.2 Motorin yakıtının analiz neticeleri .....	38
Çizelge 6.3 Dizel motorun teknik özellikleri .....	38
Çizelge 6.4 Gaz analiz cihazının ölçüm aralığı ve hassasiyeti .....	40

## ÖNSÖZ

Bu tezi hazırlarken bilgi ve tecrübelerinden daima istifade ettiğim danışman hocam Yrd. Doç. Dr. Muammer Özkan'a teşekkürlerimi sunmayı bir borç bilirim. Deneysel çalışmalarımızı birlikte yürüttüğümüz değerli arkadaşım Burak Durmaz ile çalışmamızda yardımlarını esirgemeyip deneysel çalışmaları koordine eden Arş. Gör. Berk Özoğuz'a da teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmamın sürecinde desteklerini benden hiçbir zaman esirgemeyen aileme ve dostlarıma sonsuz şükranlarımı sunarım.

## ÖZET

Günümüz dünyasında küresel ısınmanın canlı hayatına dönük önemli bir tehdit olduğu gerçeğinin kabul edilmesiyle birlikte atmosfere salınan gaz emisyonlarını aşağıya çekecek teknolojilere olan ihtiyaç artmıştır. Bu ihtiyaçla birlikte rezervi azalan ve fiyatları artan fosil yakıtlara en güçlü alternatiflerden biri olan biyodizel ile ilgili çalışmalar büyük bir ilgi çekmektedir.

Bu çalışmanın amacı; motorin ve kanoladan elde edilmiş biyodizel yakıtlarının güç, yakıt tüketimi, emisyonlar ve is yönünden EGR stratejilerinin karşılaştırmalı bir analizini yapmaktır.

Çalışmada dört zamanlı, dört silindirli, indirek püskürtmeli bir dizel motoru kullanılarak her iki yakıt için tam yükte altı ayrı devirde %0, %5, %10, %15 ve %20 EGR oranlarında NO<sub>x</sub>, CO, HC, karbondioksit, HFK, is, moment, güç, özgül yakıt tüketimi ve maksimum silindir basıncı değerleri kaydedilmiş ve karşılaştırılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** EGR, biyodizel, kanola, NO<sub>x</sub>, emisyonlar, is

## **ABSTRACT**

In today's world, by the acceptance of the serious threat of global warming to bio-life has increased the need for the technologies that lowers the harmful emissions. For this reason, the researches on biodiesel, one of the most important alternatives of fossil fuels which has an increasing price and decreasing reserves; gains more interest.

The aim of this work is to make a comparative analysis of EGR strategies between rapeseed methyl ester and diesel fuel regarding power, specific fuel consumption, exhaust and smoke emissions.

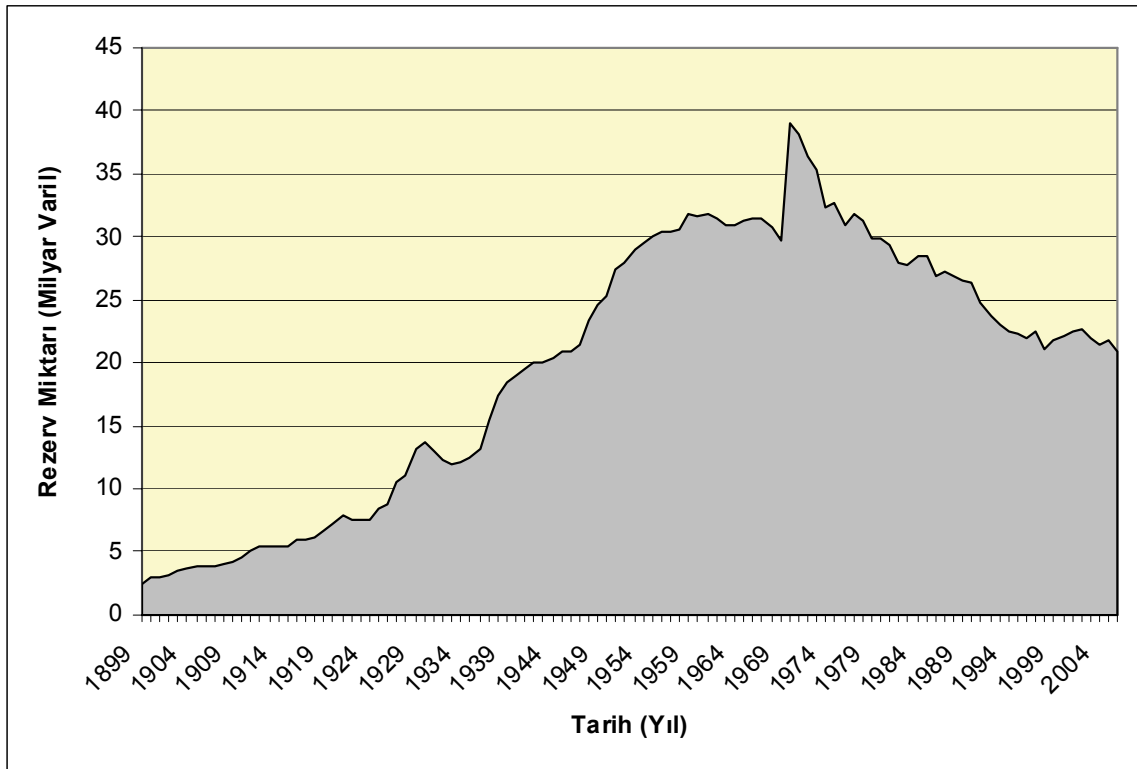
In this work; we used four stroke, four cylinder IDI diesel engine in full load conditions and six different speeds with %0, %5, %10, %15 and %20 EGR ratios for each fuels. NO<sub>x</sub>, CO, HC, carbon dioxide, excess air ratio, smoke emissions; torque, power, specific fuel consumption and maximum cylinder pressure values were calculated and compared.

**Keywords:** EGR, biodiesel, rapeseed methyl ester, NO<sub>x</sub>, emissions, soot

## 1. GİRİŞ

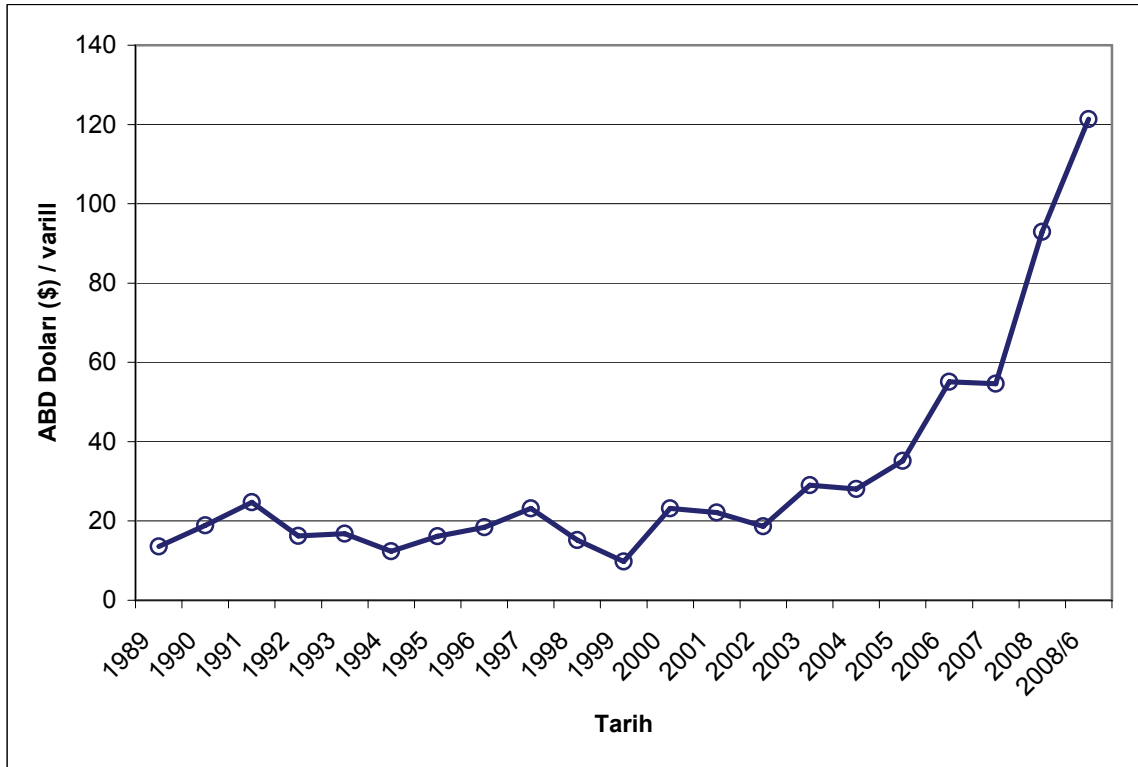
İnsanlık, tarih boyu edindiği, bilhassa 17. yüzyılın aydınlanma felsefesiyle başlayan süreçte elde ettiği bilimsel birikimi 18. ve 19. yüzyılda gerçekleştirdiği sanayi devrimi ile üretime geçirmiştir. Elde edilen bilimsel bulguların üretime ve dolayısıyla paraya çevrilmesiyle birlikte üretimi arttırmaya ve geliştirmeye yönelik çalışmalar, araştırmalar büyük bir ivme kazanmıştır. Bunun temel bir neticesi olarak üretimin olmazsa olmazı enerji ihtiyacı ortaya çıkmıştır. Bu safhada kömür-buhar eksenli enerji üretimine alternatif olabilecek yeni tekniklerin, hammaddelerin ve bunların kullanılacağı makinelerin icadı kaçınılmaz hâle gelmiştir.

Sanayi devriminin batı uygarlığı tarafından nispeten hazmedildiği 19. yüzyılın son çeyreğindeyse, verimi buhar makinelerine nazaran daha yüksek olan kuvvet makineleri; otto ve dizel motorları icat edilmiştir. Bu motorlar kömür gibi katı yakıtlar yerine sıvı yakıtlar kullanacak şekilde tasarlanmıştır. 20. yüzyılın başından itibaren pek çok alanda kullanılmaya başlayan bu içten yanmalı motorların temel enerji kaynağı olarak petrol türevli yakıtlar kullanılmıştır.



Şekil 1.1 Dünya petrol rezervlerinin değişimi (1899 - 2006) [1]

20. yüzyıl başında henüz küreselleşme kavramını bilmeyen ve daha önemlisi yeterli çevre bilinci olmayan insanoğlu; tabiatın milyonlarca yıl süren bir süreçte yerin altında depoladığı yüksek karbon içerikli petrolü açığa çıkarıp enerjiye çevirmek suretiyle dünyanın bu çok önemli zenginliğini giderek artan bir şekilde tüketmiştir. 20. asırda devletlerin temel tüketim maddesi halini alan petrol uluslararası arenada gücün de sembolü haline gelmiş, azalan rezervler ile artan fiyatı ülkeleri daha ucuz alternatiflere yöneltmiştir.



Şekil 1.2 Dünya Ham Petrol Fiyatlarının Son 20 Senedeki Değişimi [2]

Bunun yanında petrolden elde edilen enerjinin gezegenimize en büyük faturası ise yakıtların atmosfere saldığı çeşitli gaz emisyonlarıyla kirletilmesi neticesinde meydana gelen sera etkisinin yol açtığı küresel iklim değişikliği olmuştur. Özellikle 20. yüzyılın son çeyreğinde, sera etkisini arttıran gazların atmosfere insan eliyle salımı neticesinde küresel iklimin değiştiği, dünya sıcaklık ortalamasının giderek arttığı gerçeğinin anlaşılmasıyla beraber; teknolojik çalışmaların bu gerçeği de dikkate alarak yapılması mecburiyeti ortaya çıkmıştır. İnsanın kendi refahı için yaptığı teknolojik ilerlemelerin geri dönüp kendisinin ve diğer canlıların yaşamını tehdit eder bir neticeye varması, uluslararası toplumca alınması gereken önlemleri zarurî hale getirmiştir. Bunların başında atmosfere salınan çeşitli emisyon gazlarının

sınırlandırılması gelmektedir. Sınırlama getirilen gazların başında azotoksitler (NO<sub>x</sub>), hidrokarbonlar (HC), karbonmonoksit (CO) ve is partikülleri (PM) gelmektedir. Hatta bir kirletici olarak nitelendirilemeyecek ideal yanma reaksiyonu ürünü olan karbondioksit (CO<sub>2</sub>) gazının Avrupa Birliği'nce 2012 yılından itibaren sınırlandırılmasının teklif edilmesi, bu acil ihtiyacın önemini gösteren önemli bir delildir (Anonim, 2005).

Tükenir bir enerji kaynağı olan petrolün yerine ikame edilecek bir kaynak arayışı çalışmaları, özellikle siyasî kriz ve savaşların yoğun olarak yaşandığı soğuk savaş döneminde sürekli artan petrol fiyatları sebebiyle büyük bir ivme kazanmıştır. Bu araştırmalar hidrojene dayalı enerji sistemleri, güneş kaynaklı enerji sistemleri, bitkisel/hayvansal yağ bazlı yakıtlar olarak sıralanabilir.

Dizel motorunun mucidi Rudolf Diesel'in 1898 Paris Dünya Fuarında sergilediği motorunu yer fıstığı yağıyla çalıştırması, içten yanmalı motorlarda bitkisel/hayvansal yağ bazlı yakıt kullanımının ilk örneğidir (Çanakçı vd., 2006). Günümüzde biyodizel adı verilen; bitkisel ve hayvansal kaynaklı yağların esterleşmesi reaksiyonu ürünü olan "yağ asidi alkil esterleri", atmosferin karbon döngüsüne ilave bir katkısı olmayan bir yakıt olmanın yanında, birkaçı dışında emisyonlar açısından konvansiyonel dizel yakıtı motorine göre daha avantajlı bir konumdadır. Dolayısıyla günümüzde fosil türevli yakıtlara alternatif olabilecek hâlihazırdaki en kuvvetli adaylardan biri olan biyodizelin motorine nazaran mevcut dezavantajlarını en aza indirecek, hatta avantaja çevirebilecek bilimsel araştırmalara çok büyük bir ihtiyaç vardır.

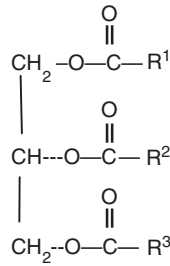
Biyodizelin motorin karşısındaki en büyük dezavantajlarından biri de yüksek NO<sub>x</sub> emisyonuna sebebiyet vermesidir. Bünyesindeki oksijen sayesinde çok daha iyi bir yanma ve daha yüksek bir yanma sonu sıcaklığına sahip olan biyodizel yakıtının bu dezavantajını en az maliyetle azaltacak yöntem hiç kuşku yok ki EGR sistemidir. Çalışmamızda kanola yağından elde edilmiş bir biyodizel yakıtı ile motorinin EGR stratejilerinin; performans, yakıt tüketimi ve emisyonlar açısından karşılaştırılması hedeflenmiştir.

## 2. BİTKİSEL YAĞLAR VE BİYODİZEL

### 2.1 Bitkisel Yağlar

Ham bitkisel yağların dizel motorlarda kullanımıyla ilgili 20. yüzyılın başlarından itibaren yapılan çalışmalar göstermiştir ki bu yüksek viskoziteli yakıtlar kısa süreli çalışmalarda olumlu neticeler verse de uzun süreli çalışmalarda enjektör uçlarının tıkanması, segman piston yapışması, kurum ve tortu oluşumu gibi olumsuzluklara sebebiyet vermektedir. Tüm bu sebeplerin altında yatan asıl neden yüksek moleküler ağırlıktan ileri gelen yüksek viskozitedir (Çanakçı vd., 2005). Çeşitli bitkisel yağların kinematik viskoziteleri 30 ilâ 40 cSt (38 °C) arasında değişmektedir. Bitkisel yağların yüksek viskoziteleri temel olarak moleküler yapılarının 600-900 g/mol gibi yüksek mertebelerde olmasından kaynaklanmaktadır. Bitkisel yağların parlama sıcaklığı ise 200 °C'nin üstündedir. Isıl değer bakımından yaklaşık 45 MJ/kg olan motorinden %10 daha düşük değerlerdedir (Murugesan vd., 2008).

Motorin doymuş, dallanmamış 12 ilâ 18 karbonlu organik moleküler yapıdadır. Ham bitkisel yağlar ise düz zincirli organik bileşiklerden karmaşık protein ve yağda çözünen vitaminlere dek pek çok molekül içerir. Bitkisel yağlar yapılarında genellikle bir mol gliserol ve üç mol yağ asidinden müteşekkil trigliserit adı verilen dallanmış bileşikler ihtiva ederler (Agarwal, 2007).



Şekil 2.1 Trigliseritlerin yapısı (Agarwal, 2007)

Şekil 2.1'de trigliseritlerin yapısında gösterilen R<sup>1</sup>, R<sup>2</sup> ve R<sup>3</sup> dalları yağ asidi zincirine karşılık gelmektedir. Yağ asitleri karbon sayılarına göre zincir uzunluğu ve çift bağa sahip olmalarına göre doymuşluk/doymamışlık özelliklerine göre çeşitlilik arz etmektedir (Agarwal, 2007).

Çizelge 2.1 Genel yağ asitlerinin kimyasal yapıları (Murugesan vd., 2008)

Yağ asidinin adı	Yağ asidinin kimyasal adı	Bağ yapısı	Kimyasal formül
Laurik	Dodekanoik	12:0	C <sub>12</sub> H <sub>24</sub> O <sub>2</sub>
Miristik	Tetradekanoik	14:0	C <sub>14</sub> H <sub>28</sub> O <sub>2</sub>
Palmitik	Hekzadekanoik	16:0	C <sub>16</sub> H <sub>32</sub> O <sub>2</sub>
Stearik	Oktadekanoik	18:0	C <sub>18</sub> H <sub>36</sub> O <sub>2</sub>
Araşidik	Eikosanoik	20:0	C <sub>20</sub> H <sub>40</sub> O <sub>2</sub>
Behemik	Dokosanoik	22:0	C <sub>22</sub> H <sub>44</sub> O <sub>2</sub>
Linoleik	Tetrakosanoik	24:0	C <sub>24</sub> H <sub>48</sub> O <sub>2</sub>
Oleik	<i>cis</i> -9-Oktadekenoik	18:1	C <sub>18</sub> H <sub>34</sub> O <sub>2</sub>
Linolik	<i>cis</i> -9, <i>cis</i> -12-Oktadekadienoik	18:2	C <sub>18</sub> H <sub>32</sub> O <sub>2</sub>
Linolenik	<i>cis</i> -9, <i>cis</i> -12, <i>cis</i> -15-Oktadekatrienik	18:3	C <sub>18</sub> H <sub>30</sub> O <sub>2</sub>
Erukik	<i>cis</i> -13-Dokosenoik	22:1	C <sub>22</sub> H <sub>42</sub> O <sub>2</sub>

Bitkisel yağlar oksijen içeriği sebebiyle motorine göre %10 oranında daha düşük ısı değere sahiptirler. Bitkisel yağların fiziksel ve kimyasal özellikleri içindeki yağ asidi kompozisyonuna bağlı olarak değişiklik gösterir.

Çizelge 2.2 Bitkisel yağların kimyasal özellikleri (Agarwal, 2007)

Bitkisel Yağ	Yağ Asidi Kompozisyonu (% ağırlık)									
	14:0	16:0	18:0	20:0	22:0	24:0	18:1	22:1	18:2	18:3
Mısır	0	12	2	eser	0	00	25	0	6	eser
Pamuk	0	28	1	0	0	1	13	0	58	0
Krambe	0	2	1	2	1	0	19	59	9	7
Keten	0	5	2	0	0	1	20	0	18	55
Fıstık	0	11	2	1	1	0	48	0	32	1
Kanola	0	3	1	0	0	0	64	0	22	8
Aspir	0	9	2	0	0	0	12	0	78	0
Susam	0	13	4	0	0	0	53	0	30	0
Soya	0	12	3	0	0	0	23	0	55	6
Ayçiçeği	0	6	3	0	0	0	17	0	74	0
Karanja	-	3.7-7.9	2.4-8.9	-	-	1.1.-3.5	44.5-71.3	-	10.8-18.3	-

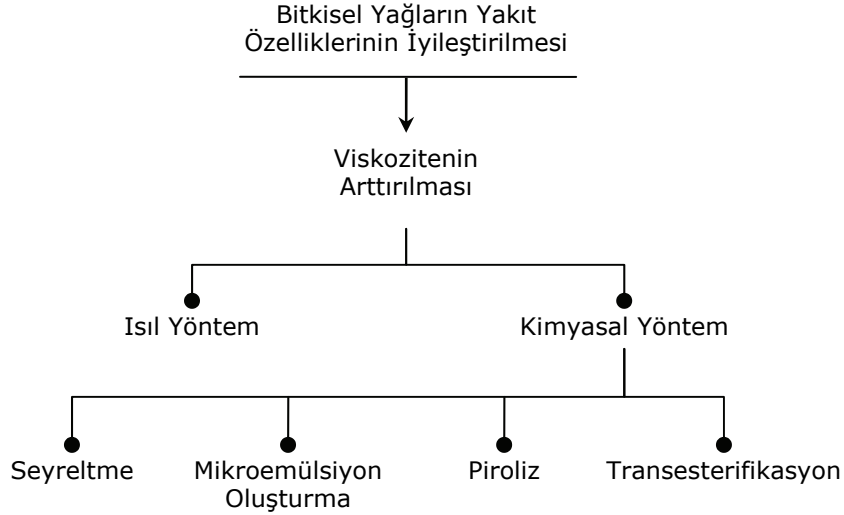
Ham bitkisel yağların dizel motorunda kullanılmasının dezavantajları şu şekilde sıralanabilir:

- Yağların türü ve kalitesi yerel iklim koşullarına göre değişebilmektedir.
- Püskürtme, atomizasyon ve yanma karakteri belirgin bir biçimde farklılaşmaktadır.
- Yüksek viskozite püskürtme prosesini etkileyerek atomizasyonu kötüleştirir.
- Yağın havayla verimsiz şekilde karışması dolayısıyla eksik yanma meydana getirerek, is emisyonlarını artırır.
- Yüksek parlama noktası düşük volatilité karakterine sebebiyet verir.
- Akma ve bulutlanma noktaları motorine göre belirgin şekilde yüksek olduğu için soğuk hava koşullarında problem çıkarır.
- Yağlama yağını seyreltir.
- Yüksek karbon birikimine sebep olur.
- Segman yapışmasına sebep olur.
- Enjektör memelerini tahrip eder (Murugesan vd., 2008).

Çizelge 2.3 Bitkisel yağların yakıt özellikleri (Murugesan vd., 2008)

Bitkisel Yağ	Kinematik viskozite 38°C (mm <sup>2</sup> /s)	Setan sayısı	Isıl değer (MJ/kg)	Bulutlanma noktası (°C)	Akma noktası (°C)	Parlama noktası (°C)	Özgül Ağırlık (kg/l)
Mısır	34.9	37.6	39.5	-1.1	-40.0	277	0.9095
Pamuk	33.5	41.8	39.5	1.7	-15.0	234	0.9148
Krambe	53.6	44.6	40.5	10.0	-12.2	274	0.9048
Keten Tohumu	27.2	34.6	39.3	1.7	-15.0	241	0.9236
Fıstık	39.6	41.8	39.8	12.8	-6.7	271	0.9026
Kanola	37.0	37.6	39.7	-3.9	-31.7	246	0.9115
Aspir	31.3	41.3	39.5	18.3	-6.7	260	0.9144
Susam	35.5	40.2	39.3	-3.9	-9.4	260	0.9133
Soya	32.6	37.9	39.6	-3.9	-12.2	254	0.9138
Ayçiçeği	33.9	37.1	39.6	7.2	-15.0	274	0.9161
Palm	39.6	42.0	-	31.0	-	267	0.9180
Babassu	30.3	38.0	-	20.0	-	150	0.9460
Motorin	3.06	50.0	43.8	-	-16.0	76	0.8550

İşlem görmemiş yağların yüksek viskozitelerinden kaynaklanan olumsuzluklar yüzünden yağların viskozitelerinin düşürülmeleri gerekmektedir. İşlenmemiş yağların yüksek viskozitelerini düşürmek amacıyla dört adet temel kimyasal yöntem kullanılır. Bunlar seyreltme (inceltme), mikroemülsifikasyon, piroliz ve transesterifikasyondur. Bu yöntemler içerisinde en yaygın kullanılanı ise transesterifikasyondur (Çanakçı vd., 2005).



Şekil 2.2 Bitkisel Yağların Viskozitelerini Azaltma Yöntemleri (Ulusoy vd., 2002)

Seyreltme işlemi bitkisel yağların motorine belirli oranlarda karıştırılması olarak tanımlanır (Ulusoy vd., 2002). Hazırlanan karışımın viskozitesi bitkisel yağdan daha düşük olur. Bu karışımın oranları standart dizel yakıtı için belirlenmiş olan en yüksek viskozite değeri ile sınırlanır. ASTM tarafından belirlenen standart dizel için en yüksek viskozite değeri 4.00 mm<sup>2</sup>/s'dir. (Ölçüm, 2006) Bitkisel yağın motorinle karıştırılarak kullanılmasıyla, tek başına kullanıldığında meydana gelen dezavantajları azalmaktadır. Bitkisel yağlar ile motorin birbiriyle çok iyi bir biçimde karışabilmektedir (Murugesan vd. 2008).

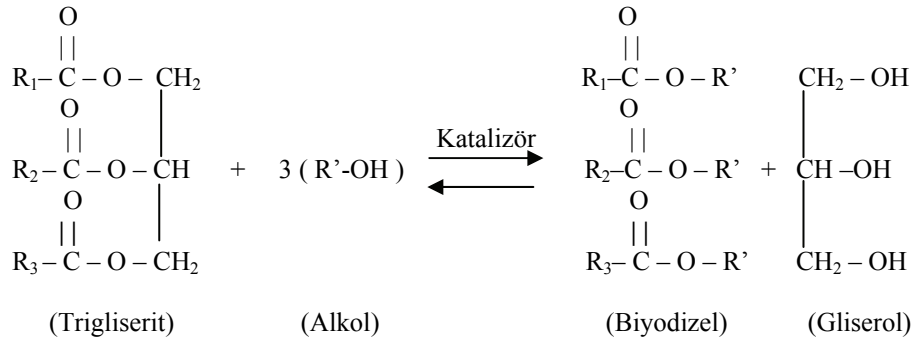
Mikroemülsiyon oluşturma işlemi bitkisel yağ ile etanol veya metanol gibi kısa zincirli alkollerin mikroemülsiyon oluşturacak şekilde karıştırılmaları esasına göre yapılır (Ölçüm, 2006).

Piroliz ya da diğer adıyla cracking işlemi; kimyasal bağların daha küçük moleküller oluşturmak amacıyla kırılması işlemidir. Bitkisel yağlar, piroliz işleminde kapalı bir kaba alınıp ısı uygulanarak ya da ASTM distilasyonu ile bozundurulularak viskozitesi düşürülür (Ölçüm, 2006).

## 2.2 Biyodizel

Biyodizel; ham ya da atık hayvansal ve bitkisel yağlardan elde edilen, dizel motorlarında motorine alternatif olarak kullanılabilen bir yakıt türüdür. Tek başına kullanılabildiği gibi motorinle karıştırılarak da kullanılabilir. Biyodizel ismi ilk olarak 1992 yılında Amerikan Ulusal Soya Dizel Geliştirme Enstitüsü tarafından telaffuz edilmiştir (Ölçüm, 2006).

Transesterifikasyon işlemi organik kimyada esterlerin alkoksi grubunun bir başka alkol ile yer değiştirmesi işlemidir (Agarwal, 2006). Bu işlemde temel olarak bitkisel ve hayvansal yağlardaki trigliseritleri parçalayarak içindeki gliserol ile reaksiyonda kullanılan alkoldeki alkil radikali yer değiştirir. Özet olarak bu işlemle gliserol esaslı triester, alkil esaslı monoestere dönüşür. İşlemin sonunda kabaca moleküler ağırlık üçte bir, viskozite de sekizde bir oranında azalır. Reaksiyonu hızlandırmak için asit, baz ya da enzim katalizör kullanılır. Reaksiyonu oda sıcaklığında gerçekleştirmesi ve katılacak alkol oranını düşürmesi sebebiyle transesterifikasyon işleminde genelde baz katalizörler tercih edilir (Çanakçı vd., 2005).



Şekil 2.3 Transesterifikasyon işlemi (Çanakçı vd., 2005)

Transesterifikasyon işlemi ile bitkisel yağların biyodizele dönüşümü reaksiyonuyla ilgili temel parametreler reaksiyon sıcaklığı, alkol ve yağın molar oranı, katalizör, reaksiyon süresi, içerikteki nem ve serbest yağ asidi miktarıdır. Reaksiyon, reaksiyon sıcaklığıyla kuvvetli bir ilişki içindedir. Genellikle işlem metanolün kaynama sıcaklığı civarında (70-80°C) gerçekleştirilir. Sıcaklık temel parametrelerdendir. Molar oran reaksiyonun ürünler yönüne etkili şekilde işleyebilmesi için önemli bir parametredir. Katalizör olarak alkali, asit ve enzim katalizörler kullanılır. Bunlar arasında alkali katalizörler en hızlı reaksiyon sağlayan katalizörlerdir. Yağın içinde bulunan su alkali katalizörlü transesterifikasyon işleminde sabun

oluşumuna sebep olduğundan istenmez (Agarwal, 2006).

Biyodizelin avantajları şu şekildedir:

- Zehirsizdir.
- Motorinden dört kat daha hızlı bozunur.
- Suda %85-88 oranında bozunur.
- Motorinle karıştırılması halinde verimi artırır.
- Yüksek parlama noktası depolama emniyeti sağlar.
- İçeriğindeki oksijen sayesinde temiz yanma sağlar.
- Kanseri Ames Testine göre %90 daha azdır.
- Yerli ve yenilenebilir enerji sağlar.
- Sera etkisine herhangi bir olumsuz katkısı yoktur. Çünkü yakıtın yanmasıyla salınan CO<sub>2</sub> ile bitkilerin atmosferden absorpladığı CO<sub>2</sub> dengededir.
- Biyodizel, dizel motorlarda çok büyük bir değişiklik yapılmadan kullanılabilir.
- Yapısında kükürt içermez. Avrupa Birliğinin dizel yakıtlarını sınırlayan kükürt içeriğiyle ilgili yönetmeliğine uygundur.
- Bazı zehirli ve reaktif hidrokarbon emisyonları açısından egzoz salımları daha düşüktür.
- Motorine kıyasla PAH ve PAH bileşikleri emisyonları açısından salımlar çok düşüktür (Murugesan vd., 2008).

Biyodizelin dezavantajları ise şu şekildedir:

- Motor %100 biyodizel ile çalıştırıldığında yakıt ekonomisi yaklaşık %10 civarında azalmaktadır.
- Soğuk havalarda motorine kıyasla yoğunluğu artmaktadır. Sıfırın altındaki soğuk hava şartlarında bir takım karışımlara ihtiyaç duymaktadır.
- Bitkisel yağların düşük üretim hacminden dolayı fiyatı yüksektir (Murugesan vd., 2008).

Biyodizelin yakıt olarak kullanılabilmesi için gerekli fiziksel ve kimyasal özelliklerine ek olarak dizel motorlarda sorunsuz olarak kullanılabilmesi için bazı özelliklere sahip olması gerekmektedir.

### 2.2.1 Enerji içeriği

Yapısında yüksek oranda aromatikler bulunan motorinin litre bazında enerji içeriği yüksektir. Biyodizeller ise yapılarında aromatikler yerine değişik doymuşluk değerlerinde metil esterleri ihtiva ederler. Biyodizeller içeriğindeki yağ asidi çeşidine göre değişik ısı değerlerine sahip olabilirler. Genel itibariyle biyodizel yakıtları motorinden düşük ısı değerlerine sahiptirler. Örnek olarak soya metil esterinin 37.2 MJ/kg'lık alt ısı değerine karşılık No. 2 dizel yakıtının alt ısı değeri 42.6 MJ/kg civarındadır. Ağırlık bazında biyodizel motorine göre %12.5 civarında daha düşük ısı içeriği sahiptir. Bu değer biyodizelin motorine göre daha yüksek özgül ağırlığı sebebiyle hacim bazında %8 değerine yaklaşır. Dizel motorlarında yakıt püskürtme sistemleri hacim bazında çalıştıkları için güç kayıpları da %8.4 civarında gerçekleşmektedir. Motordan elde edilen işin yakıtın enerji içeriğine oranıyla hesaplanan gerçek verim açısından biyodizel ve motorinin önemli bir farkı yoktur. Bu yüzden tüketilen yakıtı kütle bazında hesaba katan özgül yakıt tüketimi açısından biyodizel, motorine göre yaklaşık %12.5 daha fazla değere sahiptir (Knothe vd., 2005).

### 2.2.2 Viskozite

Viskozite sıvıların iç katmanlarının birbiriyle olan fiziksel temaslarından meydana gelen akmaya karşı gösterdikleri dirençtir. Silindir içerisine püskürtülen yakıtların atomizasyonunda viskoziteleri önemli ölçüde etkilidir. Bu da yanma sonu gaz kompozisyonu ve partikül oluşumuna etki eder. Yakıtların viskoziteleri arttıkça emisyon ve partikül madde oluşumu açısından dezavantajları artar. Motorinin viskozitesi biyodizelden daha düşüktür. Avrupa EN 14214 standardına göre 40°C sıcaklıkta biyodizellerin kinematik viskoziteleri 3.5 ilâ 5.0 mm<sup>2</sup>/s değerleri arasında olmalıdır. Motorin için bu değer Avrupa EN 590 standardına göre 2.0 – 4.5 mm<sup>2</sup>/s değerleri arasındadır (Knothe vd., 2005).

### 2.2.3 Setan sayısı

Setan sayısı dizel yakıtlarının tutuşma kalitelerini gösteren boyutsuz bir sayıdır. Setan sayısı arttıkça yakıtların tutuşma gecikme süreleri kısalır. Biyodizellerin setan sayıları motorinin setan sayısından genel olarak yüksektir. Avrupa standartlarına göre motorin ve biyodizelin setan sayılarının alt limiti 51 olmalıdır (Knothe vd., 2005).

### 2.2.4 Soğuk hava özellikleri

Dizel yakıtı molekülleri soğuk havalarda kristalleşme eğilimleri gösterirler. Bu kristallerin görünür büyüklük olan 0.5µm değerine ulaştığı sıcaklığa bulutlanma noktası adı verilir. Bu sıcaklıkta yakıt saydamlığını kaybeder. Bu değer daha altında kristaller birleşerek 0.5-1 mm x 0.01 mm boyutlarına ulaşırlar. Bu kristaller yakıt filtrelerini tıkayarak akışı engeller ve soğukta ilk hareket ve performansa olumsuz etkide bulunurlar. Bu sıcaklık değerinin de altında yakıtın serbest akışını engelleyecek boyutlarda kristalleştiği sıcaklığa akma noktası adı verilir (Knothe vd., 2005). Çeşitli biyodizel yakıtlarıyla alakalı soğuk akış özellikleri Çizelge 2.4'te gösterilmektedir.

### 2.2.5 Parlama noktası

Parlama noktası; yakıtın tutuşabilir buhar oluşturabilecek en düşük sıcaklık değeri olarak tanımlanır. Bu değer benzin için -40°C, motorin içinse 52-66°C arasındadır. Biyodizel yakıtları için bu değer genelde 150°C'nin üstündedir (Knothe vd., 2005).

### 2.2.6 Depolama emniyeti

Motorin için geçerli olan depolama koşulları biyodizel için de geçerlidir. Biyodizel temiz, kuru, karanlık ve aşırı sıcak olmayan ortamlarda depolanmalıdır (Ölçüm, 2002).

### 2.2.7 Biyolojik bozunabilirlik özellikleri

Biyodizeli oluşturan metil esterler tabiatta kolayca ve hızlıca parçalanarak bozunabilirler. Suyu bıraktıklarında 20 günde biyodizelin %95'i, motorinin ise %40'ı bozunabilmektedir. Biyodizel bozunabilirlik açısından dekstroza benzerlik gösterir (Ölçüm, 2002).

### 2.2.8 Zehirleyicilik

Ağızdan alındığı takdirde biyodizel için öldürücü doz değeri 17.4 gr/kg vücut ağırlığı iken bu değer sofrata tuzunda 1.75 gr mertebesindedir. Bir başka ifadeyle sofrata tuzu biyodizelden 10 kat daha zehirleyici özelliğe sahiptir. İnsanlar üzerinde yapılan elle temas testleri biyodizelin %4'lük sabun çözeltisinden daha az toksik olduğunu göstermiştir (Ölçüm, 2002).

### 2.2.9 CO<sub>2</sub> salımı

Tam yanma reaksiyonuyla C<sub>16</sub>H<sub>34</sub> moleküler yapısıyla kilogram motorin yakıtı başına 3.11 kg CO<sub>2</sub> gazı atmosfere salınmaktadır. Bu değer C<sub>22</sub>H<sub>43</sub>O<sub>2</sub> genel moleküler yapıya sahip biyodizel

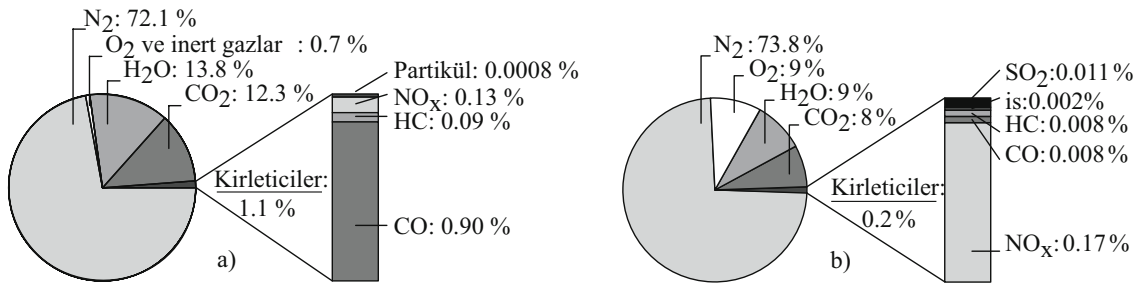
için 2.86 kg mertebesindedir. Kısmî yanma ürünü CO ve bazı aldehitler de atmosferde en sonunda CO<sub>2</sub> gazına dönüşürler. Petrol türevli motorin ile her kilogramı için atmosferde olmayan 3.11 kg'lık ek bir CO<sub>2</sub> miktarı salın yapılıırken biyodizelde; elde edildiği bitkinin son birkaç sene içerisinde atmosferden bünyesine fotosentezle bağladığı karbon atomları yakıt haline getirilip tekrar atmosfere salınır. Bu sebepten biyodizel karbon döngüsüne ilave bir katkı yapmadığından küresel ısınma açısından motorine göre avantajlıdır (Peterson ve Hustrulid, 1997).

Çizelge 2.4 Çeşitli bitkisel yağ metil esterlerinin yakıt özellikleri (Knothe vd., 2005)

Bitkisel Yağ Metil Esteri	Kinematik viskozite 40°C (mm <sup>2</sup> /s)	Setan sayısı	Isıl değer (kJ/kg)	Bulutlanma noktası (°C)	Akma noktası (°C)	Parlama noktası (°C)
Mısır	4.52	65.0	38480	-3.4	-3.0	111
Pamuk	(20°C) 6.80	51.2	?	?	-4.0	110
Zeytin	4.70	61.0	37287	-2.0	-3.0	>110
Kanola	(37.8°C) 4.76	47.9	39870	-3.0	-9.0	166
Aspir	?	49.8	40060		-6.0	180/149
Soya	3.99	55.9	39753	1.0	0.0	185
Ayçiçeği	4.39	58.0	38742	1.5	3.0	110
Don Yağı	4.99	61.8	39961	15.6	12.8	187.8
Atık Kızartma	4.50	59.0	37337	1.0	-3.0	>110
Motorin	3.06	50.0	43.8	-	-16.0	76

### 3. DİZEL MOTORLARINDA EGZOZ EMİSYONLARI

Motorlarda  $C_xH_y$  genel molekül yapısıyla gösterilen yakıtların ideal tam yanma reaksiyon ürünleri  $N_2$ ,  $O_2$ ,  $CO_2$  ve su buharı ( $H_2O$ )'dır. Gerçekte ise yanma tam olarak gerçekleşemez ve bu reaksiyon ürünlerine yanmamış hidrokarbonlar (HC), karbonmonoksitler (CO), azotoksitler ( $NO_x$ ) ve partikül maddeler (PM) eklenir. İnsan sağlığına olumsuz etkileri olan bu ürünlerin yanı sıra canlıların sağlığına doğrudan etkisi olmayan karbondioksit, sera etkisi üzerinde kısmî etkisi bulunan bir gazdır (Merker vd., 2006).



Şekil 3.1 Ham egzoz gaz kompozisyonları: a) Otto b) Dizel (Merker vd., 2006)

#### 3.1 $CO_2$ Oluşumu ve Kontrolü

Karbondioksit atmosferde doğal olarak bulunan ve normal yanma ürünü bir gazdır. İdeal olarak hidrokarbon bir yakıtın yanma ürünü sadece  $CO_2$  ve su buharıdır. Bunların oluşum oranları yakıtın karbon ve hidrojen oranına göre değişir. Motorinin C/H oranı 1:1.75 civarındadır.  $CO_2$  emisyonlarını düşürmek için yakıtın birim enerji başına karbon içeriğini düşürmek ya da motorun özgül yakıt tüketimini azaltmak gerekir. Küresel ısınmaya sebep olan sera etkisini artırıcı gazların başında yer alan  $CO_2$  kaçınılmaz olarak asıl yanma ürünü olduğundan egzoz gazına motor sonrası müdahalelerle azaltılması mümkün değildir. Hatta motor sonrası müdahale sistemlerinden katalitik dönüştürücülerle HC ve CO emisyonlarının  $CO_2$ 'ye çevrimi sebebiyle bu sistemlerde  $CO_2$  miktarında çok hafif artışlar oluşur (Challen ve Baranescu, 1999).

#### 3.2 CO Oluşumu ve Kontrolü

Karbonmonoksit zehirli bir kısmî yanma ürünü gazdır (Challen ve Baranescu, 1999). Silindir içindeki dolgunun zengin karışım bölgelerinde oksijen azlığı sebebiyle eksik yanma ürünü olarak CO gazı meydana gelir (Merker vd., 2006). CO emisyonları hava fazlalık katsayısıyla

sıkı bir biçimde bağlantılıdır. Dizel motorlar bütün çalışma şartlarında fakir karışımla çalıştıkları için CO emisyonları genelde son derece düşük, yönetmeliklerle konulan sınırların altında ve önemsenmeyecek düzeydedir. Katalitik dönüştürücülü sistemlerde CO, egzoz gazında arta kalan O<sub>2</sub> ile reaksiyona sokularak CO<sub>2</sub> gazına dönüştürülür ve CO emisyon değerleri aşağıya çekilebilir (Challen ve Baranescu, 1999).

### 3.3 Yanmamış Hidrokarbonların Oluşumu ve Kontrolü

Yanmamış hidrokarbon (HC) emisyonları tamamen reaksiyona girmeyen ya da kısmî olarak reaksiyona girmiş yakıt moleküllerinden oluşur. HC emisyonları bütünüyle buhar fazındaki yakıtlardan oluşur. Katı haldeki hidrokarbonlar partikül madde emisyonlarına dâhil edilirler. Dizel ve otto motorlarında HC oluşum mekanizmaları birbirinden farklıdır. Otto motorlarındaki HC molekülleri, alev cephesinin ulaşmasının mümkün olmadığı piston-silindir-segman arası gibi küçük boşluklardaki hava-yakıt karışımlarından kaynaklanır. Dizel motorlarında ise sıkıştırılan dolguda sadece hava olduğundan bu yanmayı gerçekleştirecek hava miktarını düşürür. Fakat dizelde yanmaya katılmayan yakıtların miktarı önemsiz düzeydedir. Yanma homojen olmayan bir karışımla meydana geldiğinden HC oluşumu toplam hava fazlalık katsayısından etkilenmez. Dizel motorlarda HC emisyonları iki temel mekanizmayla oluşur (Challen ve Baranescu, 1999).

İlk mekanizmaya göre sıcak havaya püskürtülen yakıt molekülleri ısınarak buharlaşır ve tutuşabilir sıcaklığa ve hava/yakıt oranına ulaşan kısımlardan tutuşma başlar. Sadece tutuşabilir karışımlar yanmaya katılır. Tutuşma gecikme süresinde püskürtülen yakıt, havayla fazlaca karıştıklarından dolayı fakir karışım bölgeleri oluşturur ve bu bölgelerin yanma süreci boyunca yakıt açısından yeterli orana ulaşması mümkün olmayabilir. Bu bölgeler yanmamış HC emisyonlarının önemli bir kaynağıdır.

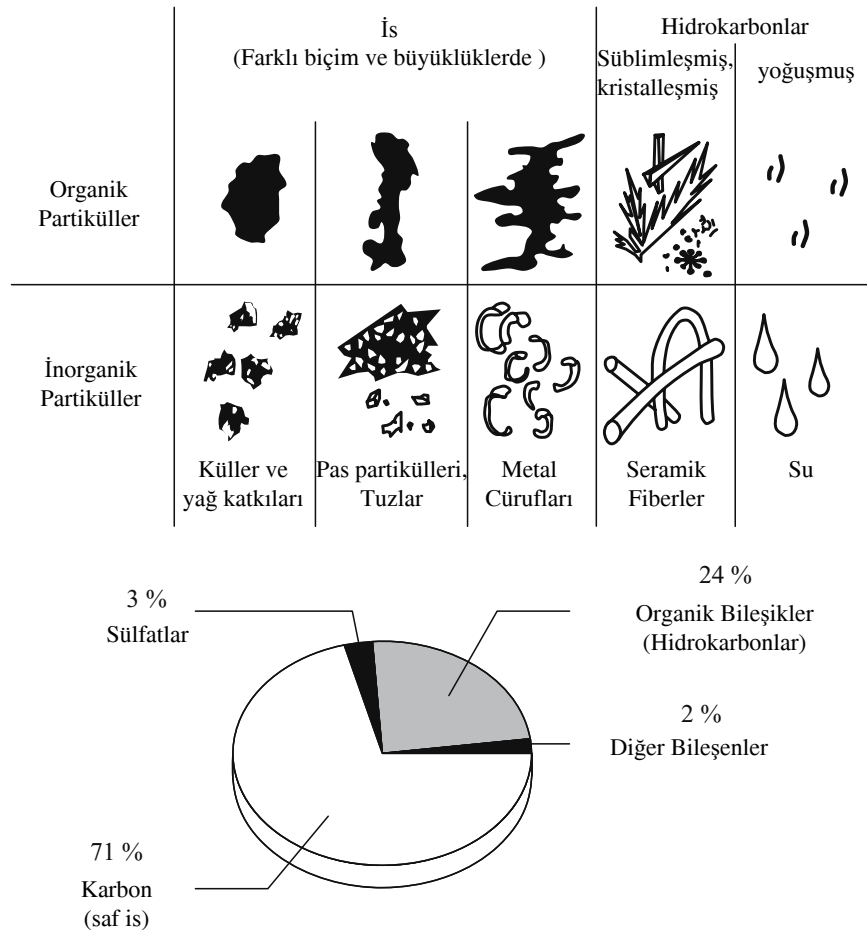
İkinci mekanizmaya göre püskürtme işleminin sonunda son püskürtülen yakıt demetinin havayla yeterince karışamaması durumunda genişleyen silindir içi hacmine bağlı olarak düşen sıcaklık ve basınçlar bahsedilen hava/yakıt bölgelerini tutuşturabilecek seviyenin altına inebilir. Özellikle enjektör iğnesinin kapanma hızı, iğne oturma yüzeyi gibi püskürtme sisteminin dizaynında yapılacak değişikliklerle buradan kaynaklanan HC emisyonları düşürülebilir.

Sayılan iki mekanizmaya ek olarak yanma odası çeperlerindeki soğuk yakıt moleküllerinin havayla yeterli oranda karışamaması sebebiyle diğerleri kadar önemsenmeyecek düzeyde

yanmamış HC emisyonları ortaya çıkabilmektedir. HC emisyonları katalitik dönüştürücülerde oksijenle reaksiyona sokularak azaltılabilmektedir (Challen ve Baranescu, 1999).

### 3.4 Partikül Madde Emisyonlarının Oluşumu ve Kontrolü

Partikül Madde (PM) emisyonları, dizel motorlarında  $\text{NO}_x$ 'le beraber üzerinde en fazla durulan zararlı emisyonlardır. PM; is, islerin üzerine yapışmış HC'lar, sülfat, su ve kül gibi maddelerden oluşur (Challen ve Baranescu, 1999). PM emisyonları sıcaklığı  $52^\circ\text{C}$ 'ye kadar düşürülmüş egzoz gazının bir filtreden geçirilerek filtrenin ağırlığındaki artışın ölçülmesiyle hesaplanır. PM emisyonlarının %95'i organik, %5'i ise inorganik maddelerden oluşur (Merker vd., 2006).



Şekil 3.2 Dizel motorlarda partikül madde kompozisyonu (Merker vd., 2006)

Partikül madde emisyonlarının en büyük dilimini oluşturan is partikülleri karbon atomlarının çok yüksek sıcaklıklarda oksijensiz olarak yanmasıyla meydana gelirler. Görünüm olarak siyah renktedirler. Emisyon değerleri duman ölçümü değerleriyle uyumludur. Çözülebilir

hidrokarbon içeriğinin bir kısmı (%25 ilâ %50) ise HC emisyonlarıyla uyum içindedir (Challen ve Baranescu, 1999).

İs oluşum mekanizması temel olarak bilinse de detaylarında halen çözülmeyi bekleyen sırları bulunmaktadır. Bu yüzden is oluşum mekanizmasını modellemek oldukça problemlidir. Partiküllerin oluşum prosesi mevcut bilgiler ışığında şu şekilde sıralanabilir:

- Yakıt molekülleri asetilen ( $C_2H_2$ ) ve propinil ( $C_3H_3$ ) moleküllerine parçalanır ve ilk benzen zincirleri oluşur.
- Polimerleşme ve dehidrasyon ile polisiklik aromatik hidrokarbonlar (PAH) oluşur.
- Yoğuşma neticesinde 1-2 nm çapındaki is çekirdekleri oluşur.
- İs çekirdekleri birleşerek 10-20 nm çapındaki temel is partiküllerini oluştururlar. Bunlara diğer maddeler eklenerek partikül boyutu artar.
- Temel is partikülleri bir araya gelerek uzun, zincirli bir yapıya dönüşürler.
- İs partikülleri ve ara türler  $O_2$  ve OH radikalleriyle oksitlenerek yıkılırlar. (Merker vd., 2006)

İs oluşumu zengin karışım ve yüksek sıcaklık faktörlerinin önemli rol oynadığı piroliz reaksiyonlarıyla oluşur. Bu yüzden is oluşumunu azaltmak için sıcaklıkların çok yüksek mertebelere ulaşmasından evvel çok iyi bir karışım teşkili gereklidir. Oluşan is partikülleri eğer sıcaklık yeterince yüksekse oksijenle karşılaştıklarında yanarak  $CO_2$ 'ye dönüşürler. Bu da silindir içi is miktarının egzoz çıkışından daha yüksek olduğunu göstermektedir. Öyle ki is partiküllerinin %90'ı silindir içinde oksitlenerek yıkılırlar (Challen ve Baranescu, 1999).

Eldeki kanıtlar, is oluşumunun motor dizayn parametrelerinden ve çalışma şartlarından çok fazla etkilendiğini göstermektedir. Buradan hareketle is oluşumunu azaltmak için karışım oranını arttırmak gerekir. Bu da daha iyi bir püskürtme sistemi ve yanma odası dizaynıyla mümkündür. Büyük yakıt damlaları çok daha büyük yüzey alanına sahip olduklarından buharlaşıp karışım oluşturma ve oksijenle reaksiyona girme kabiliyetleri düşüktür. Atomizasyonun artması için daha küçük enjektör meme delik çapı ve yüksek yakıt hızlarına ihtiyaç vardır ki bu da püskürtme basıncını arttırmakla elde edilir. Simetrik enjektör delikleri yakıt demetinin daha geniş ve üniform olarak karışım yapmasını sağlar. Aşırı doldurma sistemleriyle silindirlere alınan hava miktarı, dolayısıyla oksijen miktarı artacağından is

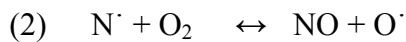
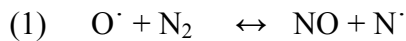
oluşumu azalır. Bunun yanında sıkıştırma oranını arttırarak yanma sonu sıcaklıklarını yukarıya çekmek, yüksek yüklerde is oluşumunu arttırsa da düşük yüklerde kısalan tutuşma gecikme süresi nedeniyle is oluşumunda azalma meydana gelir. Motor sonrası müdahalelerle PM emisyonlarını azaltmak mümkündür. Katalitik dönüştürücülerle partikül maddelerin çözülebilir hidrokarbon kısımları, eğer egzoz sıcaklıkları yeterince yüksekse yakılarak emisyonlar düşürülebilir (Challen ve Baranescu, 1999).

### 3.5 NO<sub>x</sub> Oluşumu ve Kontrolü

Azotoksitler (NO<sub>x</sub>) dolguya alınan havadaki N<sub>2</sub> ve O<sub>2</sub> gazlarının reaksiyonuyla oluşurlar. Genel olarak azotmonoksit (NO) ve azotdioksit (NO<sub>2</sub>) gazlarından müteşekkildir. NO gazının toplam azotoksitler içindeki yüzdesi %70-90 arasındadır. NO<sub>x</sub>'ler; PM, CO ve HC gibi eksik ya da kusurlu yanma sonucu değil, bilakis tam yanma sonucu oluşan gazlardır (Challen ve Baranescu, 1999). NO<sub>x</sub> gazları atmosferin troposfer tabakasında fotokimyasal sis oluşumuna neden olurlar (Merker vd., 2006). Havadaki nemle birleşerek nitrik asit oluşumuna sebep olur. Bu da asit yağmurlarına yol açar (Challen ve Baranescu, 1999). NO<sub>x</sub>'ler solunduğunda ciğerlerdeki nemle birleşerek meydana getirdiği nitrik asit ile uzun vadede solunum hastalıklarına sebebiyet verebildiği için insan sağlığına zararlı bir gazdır. Ayrıca atmosferde ozon tabakasına zarar verdiği için çevresel etkileri de büyüktür (Haşimoğlu vd., 2002). İçten yanmalı motorlardan kaynaklanan NO gazları, atmosferde uzun bir süreçte tamamen NO<sub>2</sub>'ye dönüşürler (Merker vd., 2006).

NO oluşumu temelde 3 mekanizmayla açıklanır. Bunlardan birincisi, termal NO; atmosferik kaynaklı azotun (N<sub>2</sub>) yüksek sıcaklığa bağlı olarak *Zeldovich Mekanizması*yla meydana gelir. İkincisi, âni (prompt) NO; atmosferik kaynaklı azotun alev içerisinde Fenimore Mekanizmasıyla meydana gelir. Sonuncusu ise, yakıt NO; yakıt kaynaklı azottan meydana gelir (Merker vd., 2006).

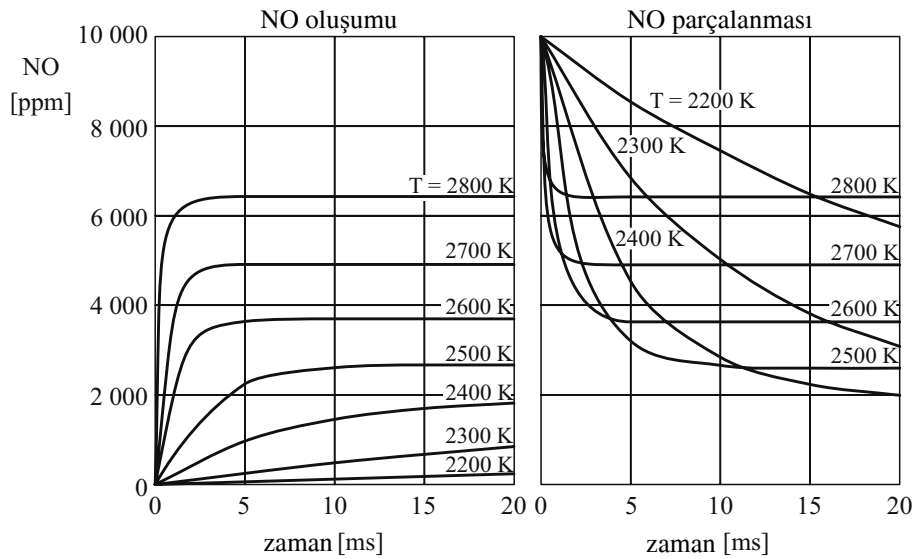
Termal NO; yanmış gazların alevin gerisinde kalan bölgesinde meydana gelen ve ilk defa 1946'da Zeldovich tarafından açıklanan bir mekanizmayla oluşur. Zeldovich tarafından basit bir şekilde izah edilen reaksiyon mekanizması 1991'de Baulch vd. tarafından geliştirilmiştir. Bu haliyle genişletilmiş Zeldovich mekanizması 3 temel reaksiyondan oluşur (Merker vd., 2006):





NO oluşumunda ortamda yeterli oksijenin bulunması ve yüksek sıcaklıklar gereklidir. Maksimum silindir içi basıncından önce yanmaya katılan gazlar NO oluşumundan birinci derecede sorumludur. Yanma sonunda gazlar daha yüksek basınç ve sıcaklıklara sıkıştırıldıkları için NO oluşumu daha çok bu safhada gerçekleşir. NO oluşumu açısından yanmanın erken safhası önemlidir. Öyle ki neredeyse bütün NO gazları yanma başlangıcından sonraki 20 °KMA zamanında meydana gelir. Bu sebepten ötürü NO oluşumunu kontrol etmek için yapılan çalışmalar yanmanın bu kısmı üzerinde odaklanmıştır (Challen ve Baranescu, 1999).

Termal reaktörde NO oluşumu ve parçalanmasıyla alakalı yapılan deneylerde basınç 60 bar ve hava fazlalık katsayısı 1 olacak şekilde sistem ayarlanmıştır. Sonuçlar göstermiştir ki; NO gazı oluşum reaksiyonu sıcaklıklar yükseldikçe daha çabuk dengeye gelmiştir. Bu 2400 K için 20 ms iken 2800 K sıcaklığında 3 ms'ye kadar düşmüştür (Merker vd., 2006).



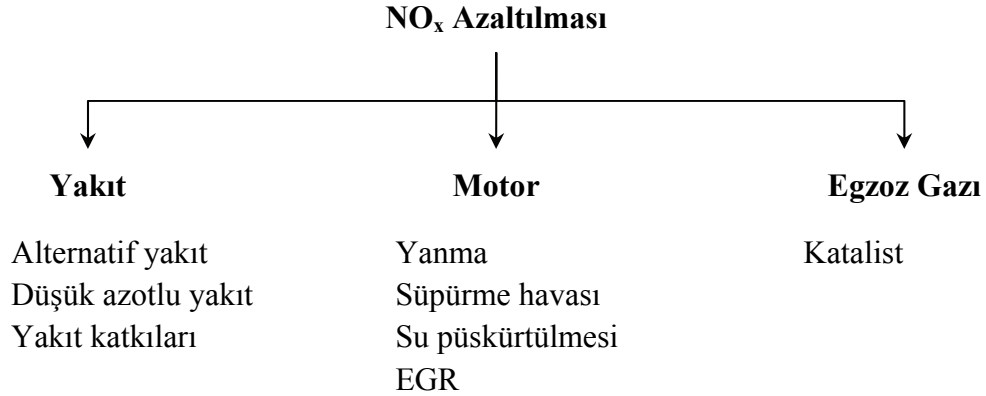
Şekil 3.3 Termal reaktörde NO oluşumu ve parçalanması,  $p=60 \text{ bar}$ ;  $\lambda=1$ , (Merker vd., 2006)

Prompt NO oluşumu alev bölgesinin önünde meydana gelen ve termal NO mekanizmasına göre çok daha karmaşık bir mekanizmaya sahiptir. Çünkü bu mekanizma pek çok reaksiyon şekli olan, CH radikalinin oluşumuyla yakından ilintilidir. Fenimore tarafından 1979 yılında açıklanan bu mekanizmaya göre CH, N<sub>2</sub> ile reaksiyona girerek hidrosiyanik asit (HCN) oluşturur ve bu ürün hızlı bir şekilde NO'ya dönüşür.



Yakıt NO mekanizması azot barındırmayan petrol türevli yakıtlardan ziyade içeriğinde en az %1 azot barındıran kömür türü yakıtları ilgilendirir.

NO<sub>x</sub> emisyonlarının azaltılması yöntemleri üç temel grupta toplanabilir. Bunlar yakıtla alakalı yöntemler, motorla alakalı yöntemler ve motor sonrası yöntemlerdir (Haşimoğlu vd., 2002).



Şekil 3.4 NO<sub>x</sub> emisyonlarını kontrol etmeye yarayan yöntemler (Haşimoğlu vd., 2002)

Başlangıçtaki ısı açığa çıkma oranına (*heat release rate*) etki eden bütün faktörler, NO oluşumuna aynı yönde etki ederler. Ön karışım fazında yanan yakıt miktarının azaltılması için püskürtme karakteristiği bu fazda daha az yakıt sevk edecek şekilde ayarlanabilir. Bunun için pilot püskürtme adı verilen erken ve çok küçük miktarda bir yakıt püskürtme ile yanma başlatılabilir. Tutuşma gecikme süresinin kısaltılması ile bu fazda yakılan yakıt miktarı düşürülebilir. Bunun için yüksek setan sayılı yakıtlar kullanılarak NO emisyonlarında az çok düşüşler meydana getirilebilir. Bu durum yüksek emme havası sıcaklığı, yüksek sıkıştırma oranı ya da turboşarj gibi faktörlerden kaynaklanan yüksek dolgu sıcaklığının olduğu durumlarda, düşük yükler için NO emisyonlarının azalmasına yol açarken yüksek yüklerde maksimum yanma sıcaklığını arttıracığından artışa sebep olabilmektedir. Helisel emme kanalı, enjektör meme deliklerinin çap ve sayıları, yanma odası dizaynı ve püskürtme basıncı gibi hava yakıt karışım teşkilini destekleyen bütün faktörler aynı zamanda başlangıç ısı açığa çıkma oranını, dolayısıyla NO emisyonlarını arttırmalar. Püskürtme zamanlamasının geciktirilmesi ile maksimum gaz sıcaklıkları düşürüldüğü gibi bu sıcaklıkta geçirilen zaman da azaltılır. Fakat bu durumda yakıt tüketiminde ve partikül madde emisyonlarında ciddi artışlar meydana gelebileceğinden sakıncalıdır. Dolguyu seyrelten ve maksimum yerel sıcaklıkları aşağılara çeken EGR ve su püskürtme yöntemleri ise silindir içi NO emisyonlarını azaltmada

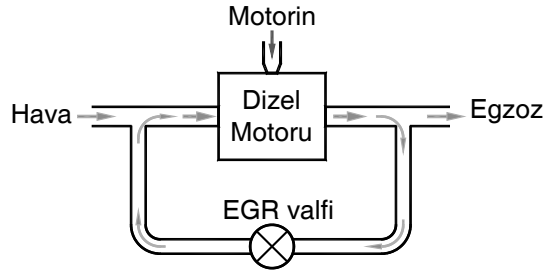
kullanılan sistemler içinde en etkili sistemlerdir. Ne yazık ki bunların pratik kullanım alanları; EGR için küçük ve orta hizmet araçlarının motorlarıyla, su püskürtmesi içinse büyük stasyon motorlarla sınırlıdır. Bütün bu dizayn ve işletme parametreleri NO-PM ve NO-yakıt tüketimi dengelerine bağlıdır (Challen ve Baranescu, 1999).

NO<sub>x</sub> üretimiyle alakalı bir başka faktör ise yerel yakıt hava oranıdır. İndirek püskürtmeli (IDI) dizel motorlarda NO emisyonları daha azdır. Bu sadece ön yanma odası yüzeylerinden kaybolan ısının maksimum sıcaklıkları düşürmesiyle değil, aynı zamanda ön karışımın yerel olarak oksijence fakir, yakıtça zengin bir ortamda tutuşmasıyla ilgilidir (Challen ve Baranescu, 1999).

Dizel motorlarda NO emisyonlarını motor sonrası müdahaleler ile azaltmak amacıyla kullanılacak katalitik dönüştürücülerin geliştirilmesi çalışmaları halen sürdürülmektedir. Egzoz gazlarında yüksek sıcaklık ve düşük oksijenle verimli olarak çalışan bu dönüştürücülerin görece düşük sıcaklık ve yüksek oksijen seviyeleriyle dizel motorlarda kullanılabilmesi zordur. Egzoz gazlarına amonyak ya da üre püskürtülerek NO emisyonlarını azaltan SCR sistemleri ise %90 oranında başarıya sahiptirler. Maliyet ve pratik uygulama dezavantajları sebebiyle kullanımları büyük stasyon motorları ve büyük hizmet motorlarıyla sınırlıdır (Challen ve Baranescu, 1999).

#### 4. EGZOZ GAZI GERİ DOLAŞIMI

Egzoz gazı geri dolaşımı (EGR); egzoz gazlarının bir kısmının, bir valf yardımıyla yük ve devir şartlarına uygun olarak debisinin değiştirilmesi suretiyle emme havasına geri gönderilmesi tekniğidir. EGR günümüzde içten yanmalı motorlarda  $\text{NO}_x$  azaltmak için kullanılan teknikler içinde en etkili olanıdır (Abd-Alla, 2002).

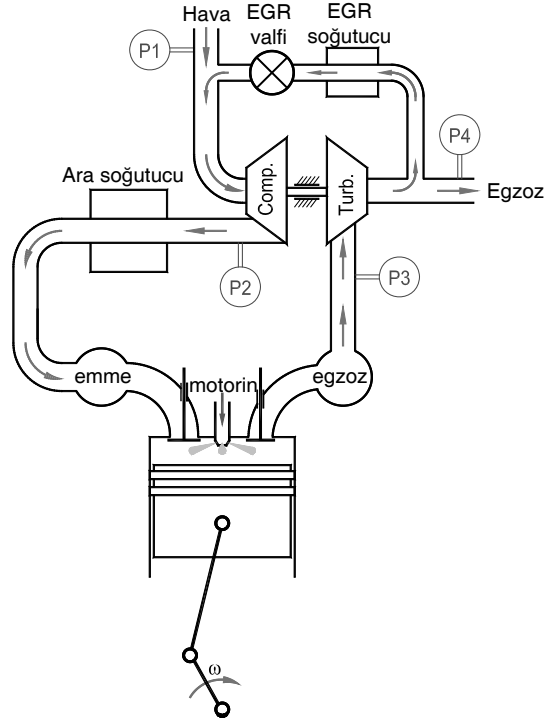


Şekil 4.1 Egzoz gazı geri dolaşımı (Zheng vd., 2004)

##### 4.1 EGR Sistemleri

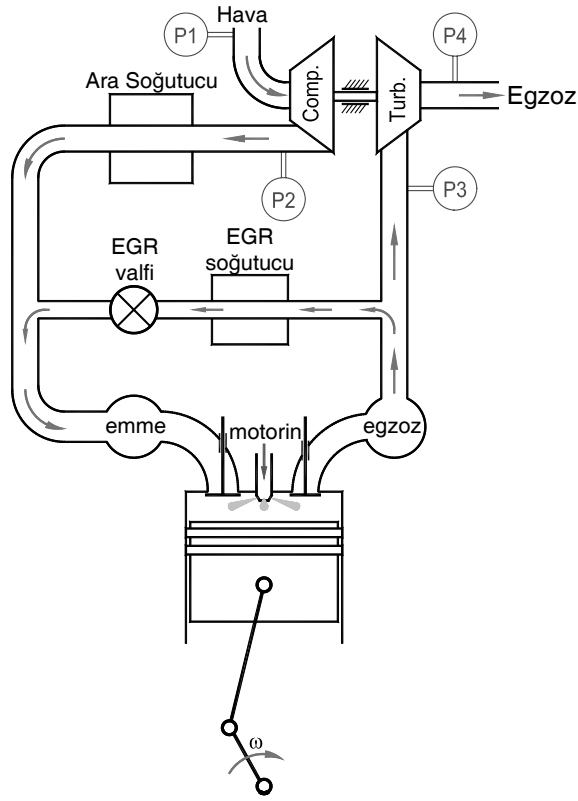
Doğal emişli dizel motorlarda EGR egzoz ve emme kanalları arasına konulan bir kanal ile yapılabilmektedir. Egzoz kanalının basıncının emmeden yüksek olması sebebiyle istenen gaz sirkülasyonu ralanti koşulları hariç kolayca gerçekleşebilmektedir. Egzoz gazları emme kanalına direkt olarak alınırsa “*sıcak EGR*”, bir soğutucudan geçirilerek alınırsa “*soğuk EGR*” olarak adlandırılır (Zheng vd., 2004).

Günümüzde üretilen dizel motorların çoğunda turboşarj olması sebebiyle EGR yapılabilmesi zor hale gelmektedir. Şekil 4.2’de gösterilen düşük basınçlı EGR düzeneğinde türbin çıkışı ile kompresör girişi arasında genellikle pozitif diferansiyel bir basınç meydana gelmektedir. Bu da EGR’yi uygulanabilir kılmaktadır. ( $[P_4 - P_1] > 0$ ) Öte yandan egzoz gaz basıncı bir kelebek ile kısılarak artırılabilirse de düşük basınçlı EGR uygulaması konvansiyonel turboşarj kompresörlerinin egzoz gazı sıcaklığına ve bünyesindeki kirletici aşındırıcı partiküllere dayanacak biçimde tasarlanmadıklarından ötürü uygulamada sorun çıkartırlar. Özetle egzoz gazına dayanıklı üretilmemiş turboşarj kompresörlü sistemlerde düşük basınçlı EGR sistemi uygulanabilir değildir. Bunun önüne geçmek için türbin çıkışını direk ara soğutucu çıkışına bağlayarak kompresörü by-pass eden sistemler düşünülmüşse de bu da kompresörün uyguladığı basıncı yenmek için ek bir EGR pompası ihtiyacını beraberinde getirdiği gibi yüksek pompalama gücü ihtiyacının yanında egzoz gazı sıcaklığı ve içeriğindeki partiküllerden kaynaklanan olumsuzlukların da bertaraf etmesi gerekir (Zheng vd., 2004).



Şekil 4.2 Düşük basınç EGR çevrimi (Zheng vd., 2004)

Turboşarjlı sistemlerde Şekil 4.3'te gösterilen türbin girişi ile kompresyon çıkışından sonraki hattı, mümkünse ara soğutucu sonrasında, birbirleriyle bağlayarak uygulanan EGR sistemleri tercih edilmektedir. Bu tür sistemlere yüksek basınç EGR çevrim sistemleri denir. Bu sistemlerde kompresör ve ara soğutucu, egzoz gazlarından kaynaklanan olumsuzluklarla karşı karşıya gelmezler. Sistemin uygulanabilir olması için türbin giriş basıncının kompresör çıkış basıncından büyük olması gerekir. ( $[P_3 - P_2] > 0$ ) Değişik şartlarda EGR uygulanabilirliğini sağlamak için turboşarj ünitesinin çalışmasını engellemeden gerekli basınç farklarını yaratabilmek için günümüzde en fazla tercih edilen sistem değişken geometriye sahip türbin sistemleridir. Bu sistemlerde gerektiğinde türbinin akış alanı daraltılarak  $P_3$  basıncı artırılıp  $P_2$  basıncı düşürülür ve bu sayede EGR için gerekli basınç farkı meydana getirilmiş olur (Zheng vd., 2004).



Şekil 4.3 Yüksek basınç EGR çevrimi (Zheng vd., 2004)

## 4.2 EGR Oranı

EGR uygulandığında taze dolgu; taze hava ve EGR ile gelen egzoz gazlarının karışımlarından oluşmaktadır. Geri dolaştırılan gazın miktarını yüzde olarak ifade etmek için EGR oranından faydalanılır. EGR oranı; geri dolaştırılan egzoz gazının kütesinin silindire alınan toplam dolgu kütesine oranı olarak ifade edilir (Zheng vd., 2004).

$$\text{EGR (\%)} = \left( \frac{m_{egr}}{m_i} \right) \times 100 \quad (4.1)$$

$$m_i = m_a + m_f + m_{egr} \quad (4.2)$$

Yukarıda verilen denklemlerde EGR yüzdesi geri dolaştırılan egzoz gaz kütesinin silindire alınan toplam kütleyle oranı şeklinde verilmiştir. Burada  $m_i$  toplam taze dolgu kütesi, alınan

taze hava kütlesi ( $m_a$ ), püskürtülen yakıt ( $m_f$ ) ve alınan egzoz gazlarının kütleleri ( $m_{egr}$ ) toplamından oluşmaktadır (Heywood, 1989).

Teker teker bu kütleleri ölçmek gibi karışık ve zor bir yol yerine EGR oranı karbondioksit oranıyla daha kolay bulunabilmektedir. Bunun için, atmosferik havanın CO<sub>2</sub> içeriğinin dikkate alınmayacak kadar düşük olması sebebiyle emme havasında bulunan bütün CO<sub>2</sub> gazının EGR ile silindirlere alındığı kabul edilir. Buradan hareketle emme havası ve egzoz gazlarındaki CO<sub>2</sub> miktarlarının oranı bize EGR oranını basit bir yolla verebilmektedir (Zheng vd., 2004).

$$\text{EGR (\%)} = \left( \frac{m_{CO_2, emme}}{m_{CO_2, egzoz}} \right) \times 100 \quad (4.3)$$

Hâlihazırda EGR, NO<sub>x</sub> azaltmak için kullanılan en etkili yöntemlerin başında gelse de beraberinde getirdiği bazı olumsuzluklar bulunmaktadır. Özgül yakıt tüketimini olumsuz etkilemesi ve partikül emisyonlarını arttırması başlıca dezavantajları arasındadır (Abd-Alla, 2002). Dizel egzozunda bulunan sülfürik tuzlar ve diğer abrasif ve korozif aşındırıcılar piston-silindir aşınmalarını arttıran etkenlerdir. Ayrıca yüksek EGR oranları çalışma kararlılığını bozduğu gibi güçten de düşmelere sebebiyet vermektedir. Bütün bu olumsuzluklara rağmen halen EGR'nin bütün işletme şartları ve hızlarda nasıl daha agresif kullanılabileceğine dair araştırmalar sürdürülmektedir. Bunun başlıca sebebi üreticileri daha az NO<sub>x</sub> emisyonları salan motorlar üretmeye zorlayan sıkı emisyon yönetmelikleridir. NO<sub>x</sub> ve PM emisyonlarını aynı anda düşürebilen ve enerji verimliğinden ödün vermeyen katalitik konvertörler halen geliştirilme aşamasında olduğundan üreticiler halen çok düşük maliyetle en iyi NO<sub>x</sub> azaltan EGR yöntemini kullanmaktadırlar (Zheng vd., 2004).

EGR'nin dizel motorlarda kullanımı ile yağlama yağı kalitesinde de düşmeler gözlenmektedir. Ağır hizmet araçlarında piston-silindir aşınmalarını çok fazla arttırdığından EGR sisteminin bu araçlara uygulanmasında ciddi problemler bulunmaktadır. EGR oranının artmasıyla CO<sub>2</sub> miktarı ve yanma gürültüsünün de arttığı belirlenmiştir. Motorun yüklemesi arttıkça gürültünün azaldığı kaydedilmiştir. NO<sub>x</sub> oluşumunun temel parametresi olan ısı açığa çıkma hızı EGR oranı arttıkça azalma gösterir. Bu da emisyon seviyesini düşürür. Araştırmalar göstermiştir ki EGR oranının artışı ile NO<sub>x</sub> emisyonlarının azalması arasında belli bir orantı vardır ve %20 EGR oranında CO ve HC emisyonlarını kötüleştirmeden NO<sub>x</sub> emisyonları yaklaşık %50 oranında düşürülebilmektedir (Abd-Alla, 2002).

## 5. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Çalışmamızda motorinle kanola biyodizelinin dört silindirli, önyanmalı bir turbo dizel motorda EGR stratejilerinin karşılaştırılmasının yapılması amaçlanmıştır. Bunun için önce EGR, dizel motorlarda biyodizel, bilhassa kanola biyodizeli kullanımı ile alakalı literatürde yapılmış olan çalışmalar incelenmelidir.

Dizel motorunda motorin kullanımıyla birlikte EGR işleminin yapılmasında bazı sakıncalar vardır. Zheng ve arkadaşları (2004) motorinin sülfürik tuzlar ve diğer aşındırıcı maddeler içerdiğini ve EGR yapılmasıyla beraber aşınmanın arttığını, bu sebeplerden dolayı halen EGR'nin dizel motorlara uygulanması konusunda çekinceler olduğunu belirtmişlerdir. Yüksek oranda EGR'nin enerji verimliliğini ciddi manada düşüreceği, çalışma kararlılığını etkileyeceği ve PM üretimini arttıracaklarını vurgulamışlardır. Bunun yanında günümüzde en etkili NO<sub>x</sub> azaltma yöntemi olarak halen EGR başta gelmektedir.

Egzoz emisyonlarıyla ilgili Knothe vd.'nin (2006) motorin, biyodizel, katıksız metil esterler ve alkan yakıtları ile altı silindirli 14 litrelik ara soğutmalı turboşarjlı, EGR'li ağır hizmet motoruyla kısmî yük şartlarında yaptıkları egzoz emisyonu araştırmasında düşük kükürtlü petrol kaynaklı motorin yakıtı baz alınmıştır. Buna göre PM emisyonları biyodizel ve metil oleat yakıtları kullanarak sırasıyla %77 ve %73 oranında azalma göstermiştir. Metil palmitat ve metil laurat yakıtları kullanılmasıyla emisyonlarda azalma daha da artarak sırasıyla %82 ve %83 oranlarına yükselmiştir. Araştırmanın bir başka sonucu olarak NO<sub>x</sub> emisyonları biyodizel ve metil oleat yakıtlarında sırasıyla %12 ve %6 civarında artış gösterirken metil palmitat ve metil laurat yakıtlarında %4-5 civarında düşüş gözlenmiştir.

Lee ve arkadaşları (2005) motorin ile çeşitli oranlarda karıştırdıkları biyodizel yakıtlarını bir common rail dizel motorunda kullanarak yakıtların atomizasyon ve yanma karakterlerini araştırmışlardır. Soya bazlı biyodizel ile yapılan araştırmada karışımdaki biyodizel oranı yükseldikçe yakıtın kinematik viskozitesi ve yüzey gerilimi artmakta, bu da yakıtın atomizasyon kabiliyetine olumsuz etki etmektedir. Araştırmanın bir başka sonucu ise artan biyodizel oranıyla azalan maksimum enjeksiyon oranıdır. Bu duruma; biyodizelin yüksek viskozitesinin sebep olduğu enjektör meme duvarıyla olan sürtünmelerin artışının yol açtığı öne sürülmüştür. Bu yüzden biyodizel kullanılacak bir dizel motorunun püskürtme basınçlarının yükseltilmesi gerektiği vurgulanmıştır. Karışımın biyodizel oranıyla paralel olarak setan sayısı da artmıştır. Bu da daha yüksek yanma sonu sıcaklıklarına sebebiyet vermiştir. Bu durum; yükselen setan sayısı ile azalan tutuşma gecikmesi ve biyodizelin

yapısında bulunan oksijenin yanmayı daha iyi hale getirmesine bağlanmıştır. Karışım oranının %55 seviyelerine kadar çıkarılmasıyla HC emisyonlarının azalacağı fakat içerikteki oksijenin artmasına paralel olarak yanma sıcaklıklarının artmasıyla NO<sub>x</sub> emisyonlarının artacağı belirtilmiştir (Lee vd., 2005).

Murugesan ve arkadaşları (2008) biyodizel ile ilgili yaptığı genel bir çalışmada CO emisyonları için düşük ve orta yüklerde artışın, yüksek yüklerde ise azalmanın meydana geldiğini öne sürmüşlerdir. CO emisyonlarının aksine PM açısından biyodizel kullanımıyla düşük ve orta yüklerde azalma kaydedilirken yüksek yüklerde artışın olduğunu belirtmişlerdir. Bununla beraber biyodizel kullanımıyla NO<sub>x</sub> emisyonlarında da azalma olduğu kaydedilmiştir (Murugesan vd., 2008).

Kanola biyodizelinin MAN-M dizel motorunda kullanımı üzerine yaptığı çalışmasında Kegl (2008); biyodizel kullanımında zararlı emisyonların azaltılmasında, bilhassa NO<sub>x</sub>'lerin azaltılmasında enjeksiyon zamanlamasının etkilerini araştırmıştır. Motorinin standart 23° KMA püskürtme avans değerleriyle biyodizelin üst ölü noktadan 23, 21, 20, 19, 18 ve 17° KMA avans değerlerini kullanarak testi hem kısmî hem de tam yük koşullarında gerçekleştirmiştir. Test ettiği parametreler efektif güç, özgül yakıt tüketimi, ısıl verim, egzoz gazı sıcaklığı ile CO, HC, NO<sub>x</sub> ile is emisyonlarıdır.

En yüksek moment koşulu ve diğer bazı test rejimlerinin sonuçlarına göre en düşük efektif özgül yakıt tüketimi 19° KMA avans değeri şartında gözlenmiştir. Kegl (2008), bu neticenin, üzerinde çalışılan motorun yakıt püskürtme sisteminin tabiatıyla açıklanması gerektiğini belirtmiştir. Sistem MAN D2566 M motorlu tek delikli bir direk enjeksiyon sistemidir. Yakıt demeti piston oyuğuna yönlendirilmiştir. Piston başında bulunan bu oyuk özellikle sıkıştırma prosesinin sonlarında girdap hareketlerini arttırmaya yardımcı olur ki bu girdap ise hava-yakıt karışım oranına etkimektedir. Fakat minimum özgül yakıt tüketimi elde etmek için hava hareketlerinin optimum seviyede olması gerekmektedir. Bu motorda bu değer ise 19° KMA avans ile sağlanmıştır. Standart motorinin avansı olan 23° KMA değerini 19'a getirmekle biyodizelin maksimum silindir basıncı 15 bar azalmış ve ÜON'den öteye kaymıştır. Bu da NO<sub>x</sub> emisyonlarını ve egzoz gazı sıcaklıklarını düşürmüştür. Kegl (2006) genel olarak bakıldığında %100 biyodizel ile çalıştırıldığında bütün değerler açısından optimum avans değerinin 19° KMA olduğunu belirtmiştir.

Yakıt demetine bakıldığında bütün çalışma şartları için motorine kıyasla biyodizelin daha dar ve uzun olduğu görülmüştür. Ayrıca SMD değeri de biyodizelin fiziksel parametrelerinden

beklendiği kadar yüksek çıkmamıştır. Kegl bunu biyodizelin ortalama enjeksiyon basınçları ve ortalama enjeksiyon oranlarının yüksek olmasına bağlamıştır. Yüksek ortalama enjeksiyon basıncı ve enjeksiyon oranı aynı zamanda zararlı is ve NO<sub>x</sub> emisyonlarını azaltabilme potansiyelini de beraberinde sunmuştur. Enjeksiyon avansını 4° düşürmekle sadece bu emisyonlar değil, tüm zararlı emisyonlarda düşme görüldüğü, güç ve yakıt tüketimindeki negatif değişimlerin ise kabul edilebilir sınırlar içinde kaldığı belirtilmiştir. Bunlardan NO<sub>x</sub> ve CO emisyonları %25, HC emisyonları %30 ve is emisyonları %50 civarında düşüş göstermiştir.

Biyodizelin motorine göre yanma karakteri, performans ve egzoz emisyonları açısından karşılaştırmasını yapan Çanakçı (2007) soya yağı metil esteri, No. 1 motorin ve No. 2 motorin yakıtlarıyla yaptığı deneylerde tüm yakıtların birbirlerine yakın ısıl verim gösterdiğini belirlemiştir. Bunun yanında %100 biyodizel özgül yakıt tüketimi açısından diğerlerine nazaran yüksek değerler vermiştir, Çanakçı bunu düşük ısıl değere bağlamıştır. Biyodizel CO, HC ve is emisyonları açısından No. 2 motorine göre belirgin şekilde düşük değerler göstermiş, fakat NO<sub>x</sub> değerleri yüksek çıkmıştır. Bunun yanında No. 1 motorinin No. 2 motorine göre daha düşük HC, CO ve NO<sub>x</sub> değerleri verirken is açısından belirgin bir fark gözlenmemiştir. Egzoz gazı sıcaklıkları açısından incelendiğinde biyodizelin diğer yakıtlara göre daha düşük sıcaklık neticeleri vermesini Çanakçı erken yanma sürecinin sebep olduğu uzayan genişleme periyoduyla açıklamıştır.

Biyodizelin püskürtme başlangıcı motorinlere göre daha erken meydana gelmiştir. Burada yakıtın fiziksel özellikleri ve bununla alakalı olarak püskürtülen miktardaki değişikliklerin pompa enjeksiyon zamanlamasına etki ettiği belirtilmiştir. Biyodizelin tutuşma gecikme süresi daha kısa olması da erken püskürtmeye eklenince biyodizelin tutuşma başlangıcı No.2 motorine göre daha erken meydana gelmiştir. Bu sebepten pompanın püskürtme avansının ayarlanması zarureti doğmaktadır. Çanakçı, biyodizelin içerisine No. 2 motorin yerine No. 1 motorinin karıştırılmasıyla yakıt sisteminde herhangi bir değişikliğe gidilmeden NO<sub>x</sub> değerlerinin düşürülebileceğini ifade etmiştir.

Rakoupulos vd. (2006), motorin ile çeşitli bitkisel yağlar ile bunların metil esterlerini %10 ve %20 oranında motorinle karıştırarak kısmî ve tam yük koşullarında direk püskürtmeli bir dizel motorunda test ederek performans ve emisyonlar açısından karşılaştırmıştır. İis emisyonları açısından bütün biyodizel karışımlarında belirgin bir düşüş gözlenmiştir. Bu düşüşün karışımlardaki biyodizel oranı arttıkça arttığı belirlenmiştir. NO<sub>x</sub> emisyonları açısından biyodizel ve bitkisel yağ karışımlarıyla bir miktar düşüş gözlenmiş, karışımdaki oranları

arttıkça düşüş de artmıştır. Biyodizel karışımlarında biyodizel oranı arttıkça CO emisyonları düşerken bitkisel yağ karışımlarında bitkisel yağ oranı arttıkça CO emisyonları da artmıştır. Bu artışa rağmen CO emisyonlarının küçük miktarlarda kaldığı belirtilmiştir. HC emisyonları açısından bakıldığında belirgin bir eğilim gözlenmemekle birlikte elde edilen değerler CO emisyonları gibi küçük mertebelerde kalmıştır. Güç ve ısı verim bakımından karışımlarda motorine kıyasla önemli bir düşüşle karşılaşılmemiştir. Bunun yanında biyodizel ve bitkisel yağ karışımlarının özgül yakıt tüketimlerinin arttığı kaydedilmiştir.

Hountalas vd.'nin (2008) ağır hizmet dizel aracı motorunda çeşitli EGR oranları için EGR gazı sıcaklığının performans ve emisyonlara etkilerini inceledikleri çalışmalarında EGR gaz sıcaklığının motor verimi, maksimum yanma basıncı ve is emisyonlarına negatif etki ettiğini ortaya çıkartmıştır. Verim ve ise olan etki motorun düşük hızları ve yüksek EGR oranlarında daha belirgindir. Bunun yanında sıcak EGR gazlarının hava/yakıt oranına da olumsuz etkisi olduğu belirlenmiştir. Sıcak gazların oksijen konsantrasyonunu azaltması is oluşumunu arttırdığı gibi is partiküllerinin oksitlenmelerini de olumsuz etkilemiştir. Araştırmada EGR gaz sıcaklığına bağlı dolgu sıcaklıklarının artması ve dolgudaki oksijen miktarının azalmasının NO oluşumuna katkısının önemsiz miktarda olduğu, bu durumun bilhassa yüksek EGR oranlarında daha bariz olduğu belirtilmiştir. Netice olarak NO<sub>x</sub> emisyonlarını azaltmak için EGR uygulandığında verimi düşürmemek ve is miktarını arttırmamak için kesin olarak EGR soğutucu uygulanması tavsiye edilmiştir.

Tek silindirli direk püskürtmeli bir dizel motorda soğuk başlangıç şartında EGR uygulamasının performans ve emisyonlar üzerine etkilerini inceleyen Peng ve arkadaşları (2008) EGR yaparak ilk yanmanın sağlandığı çevrimin maksimum basıncının EGR'siz çevrime göre %45 daha fazla olduğunu belirtmişler. Çalışmada aynı zamanda EGR ile yanmanın daha erken başladığı kaydedilmiştir.

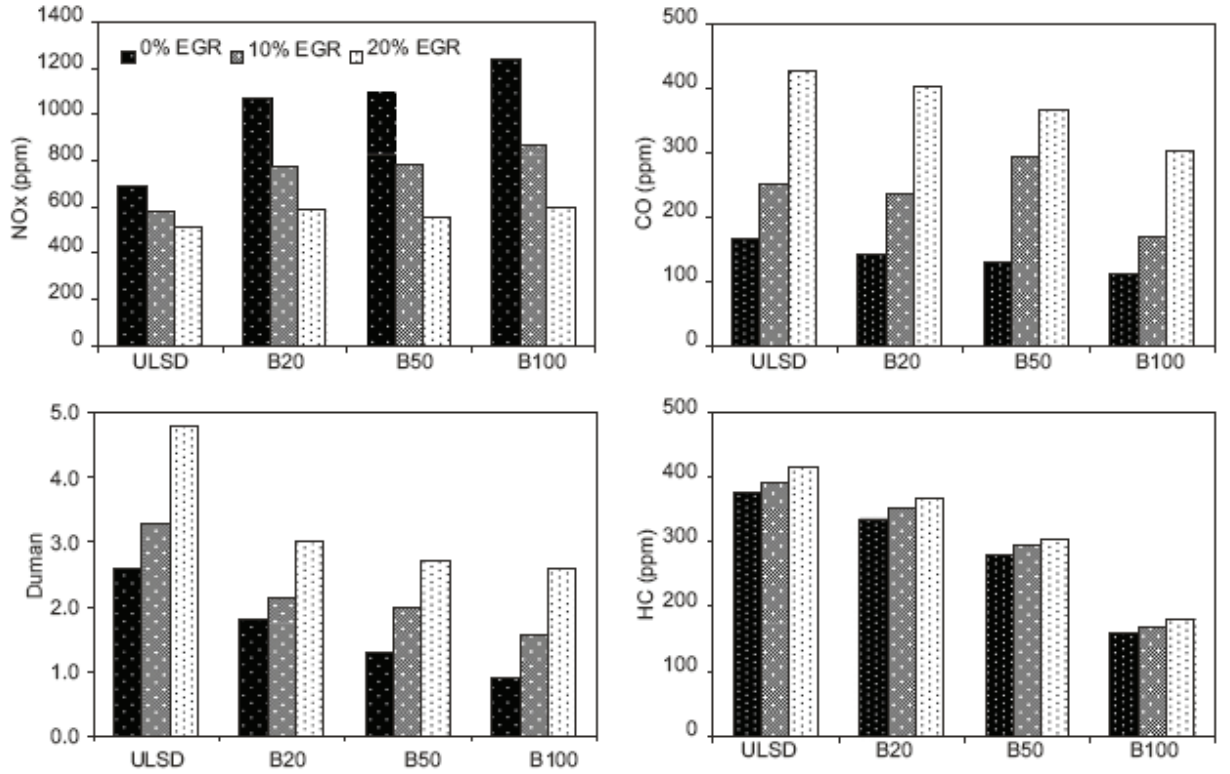
Dizel motorlarda motorin ile kanola metil esteri kullanılarak partikül boyutlarına EGR'nin etkisinin incelendiği karşılaştırmalı çalışmada Tsolakis (2006) kanola biyodizeli kullanıldığında dizel motorların daha fazla NO<sub>x</sub>, daha az is ve toplam partikül kütlesi saldıgını belirtirken kanola biyodizeli kullanıldığında partikül boyutlarının küçüldüğünün altını çizmiştir. Tsolakis, partikül boyut dağılımının azalmasıyla egzoz gazlarının zehirleyiciliğinin arttığı verisinin motorin harici; farklı fiziksel ve kimyasal özelliklere sahip yakıtlar için geçerli olmayabileceğini öne sürmüştür.

Kanola biyodizelinin EGR ile birlikte uygulandığı çalışma şartlarında NO<sub>x</sub> emisyonları

motorine göre daha fazla düşüş göstermiştir. Öte yandan EGR ile artan duman ve toplam partikül kütlesi salımı, kanola biyodizeline motorinden daha düşük olmuştur.

Tsolakis vd. (2007), kanola metil esteri ve düşük kükürtlü motorinle %20 ve %50 oranındaki karışımlarına EGR uygulanmasıyla performans ve emisyonlar üzerindeki değişimleri incelemiştir. Isı açığa çıkma oranından hareketle bütün kanola biyodizeli karışımlarının püskürtme avanslarının motorine göre arttığını gözlemiştir. Tutuşma gecikmesinin azaldığı, buna karşın önkarışım yanma fazının arttığını gözlemiştir. Bu nedenlerden dolayı silindir basınç ve sıcaklıklarının arttığını, erken tutuşmanın meydana geldiğini belirtmiştir.

Artan avansla birlikte kanola biyodizeline is, HC ve CO emisyonlarının azaldığı, buna karşın NOx ve özgül yakıt tüketiminin arttığı tespit edilmiştir. Biyodizelin bünyesindeki oksijen moleküllerinin is oluşumuna neden olan lokal zengin karışım bölgelerine etki etmeleri sebebiyle is emisyonlarının azaldığı öne sürülmüştür. Artan özgül yakıt tüketimi ise kanola biyodizelin motorinden daha düşük olan alt ısıl değerine bağlanmıştır. Araştırmada EGR uygulamasının kanola biyodizeli için motorine göre daha efektif olduğu sonucuna varılmıştır. Aynı EGR oranlarında motorinle benzer oranlarda NOx düşüşü gözlenen biyodizelde is artışının daha az olduğu gözlenmiştir. Biyodizelde EGR ile NOx düşüşünün motorine nazaran biraz daha fazla olmasını üç temel sebebe bağlamışlardır. Birinci sebep olarak EGR ile silindire alınan CO<sub>2</sub> gazının biyodizelde motorine göre daha seyrek olmasını, ikinci sebep olarak azalan bağıl hava/yakıt oranını, üçüncü sebep olarak da biyodizel ile avansı artmış olan tutuşmanın EGR ile geciktirilmesi olarak belirtmişlerdir. Saf kanola biyodizeli ve %50 karışım biyodizel kullanıldığında geciken tutuşma ile duman ve yakıt tüketiminde az miktarda artışlar kaydedildiğini, öte yandan NOx emisyonlarında ciddi düşüşler sağlandığını vurgulamışlardır.



Şekil 5.1 Biyodizel karışımlarının EGR ile emisyon değişimleri (Tsolakis vd., 2007)

Agarwal vd.'nin (2006) yaptığı çeltik kepeği biyodizeli ile çalıştırılan dizel motorlarında NOx emisyonlarının deneysel kontrolü konulu çalışmada biyodizel ve EGR kullanarak NOx emisyonlarını aşağıya çekerek aynı anda is emisyonları, HC ve CO emisyonlarında da düşüşler sağlanabileceği belirtilmiştir. %20 biyodizel karışımı ile %15 EGR oranıyla optimum değerlerin kaydedildiği, termal verimin arttığı ve egzoz emisyonlarıyla özgül enerji tüketiminin azaldığını belirtmişlerdir.

Maiboom vd. (2008) çeşitli EGR stratejilerinde EGR'nin yanma, NOx ve is emisyonlarına etkilerini araştırdıkları çalışmalarında çeşitli neticelere varmışlardır. Buna göre EGR'den kaynaklanan taze dolgu sıcaklığının artmasına bağlı olarak farklı koşullarda NOx emisyonlarının arttığı ve de azaldığı tespit edilmiştir. EGR gaz sıcaklığının NOx emisyonlarına etkisi için motorun çalışma şartlarının önemli olduğu belirtilmiştir. Düşük yük, sabit silindir basıncı koşullarında yüksek EGR oranlarıyla çok düşük NOx ve PM emisyonları elde edilebileceği belirlenmiştir. Buna sebep olarak yüksek seyrelmeye bağlı olarak geciken tutuşma gösterilmiştir. Bahsedilen şartlarda özgül yakıt tüketiminin %10 mertebesine kadar artabileceği, CO ve HC emisyon seviyelerinin yükselebileceği vurgulanmıştır.

Dizel motorlarında yakıtın oksijen içeriğinin egzoz emisyonlarına etkilerinin incelendiği Sendzikiene vd. (2006) tarafından yürütülen çalışmada motorin, etanol ve kanola biyodizeli

karışımlarıyla elde edilen neticelere göre 0 ilâ -10 °C sıcaklıkları arasında %25.72 oksijen içeriğine kadar kararlı çalışma gösterdikleri kaydedilmiştir. Üçlü bileşikle çalıştırılan dizel motorunda 1200 ve 2000 d/d hızlarında en yüksek oksijen içeriği %19.5 olarak ölçülmüştür. Oksijen içeriğinin %19.5'a çıkmasıyla PAH, NO<sub>x</sub> emisyonları ve duman miktarında azalma görülmüştür. Bunun yanında oksijen oranının %16.8 mertebesinin üstüne çıkmasıyla CO emisyonları âni olarak artış göstermiştir. Araştırmaya göre karşılaştırmalı performans ve emisyon testleri göstermiştir ki optimum dizel yakıtı oksijen içeriği %15-19 oranları arasında olmalıdır.

Leung vd. (2006) tek silindirli bir dizel motorunda saf biyodizel kullanarak çeşitli parametrelerin değişimlerinin egzoz emisyonlarına olan etkilerini incelemişlerdir. Buna göre yakıt püskürtme zamanlamasını geciktirmek suretiyle NO<sub>x</sub> emisyonlarında ciddi düşüşler kaydedilebileceği belirlenmiştir. Daha geniş plancer çapı ve daha yüksek püskürtme basınçlarıyla yakıtın püskürtme süresinin azaldığı tespit edilmiştir. Motorine göre daha düşük ısı değere sahip olan biyodizelin aynı güç ihtiyacı için silindire daha fazla sevk edilmesi gerekir. Bu sebepten püskürtme süresinin kısılması motor performansını iyileştirmek için önemli bir avantajdır. Araştırmanın neticesinde herhangi bir parametreyi tek başına değiştirerek emisyonları bütünüyle düşürmenin mümkün olmadığı fakat pek çok parametre göz önünde bulundurularak yapılan optimizasyonla çok daha iyi sonuçlar elde edilebileceği vurgulanmıştır. Buna göre geciktirilmiş püskürtme ile hızlı difüzyon yanma, biyodizel için en iyi yanma performansını veren bileşim olarak belirlenmiştir.

Honge, jatropha ve susam yağlarından elde edilmiş biyodizel ile çalışan Banapurmatha vd. (2008) termal verimleri için %80 yük şartında motorinin %31.25'lik verimine karşılık sırasıyla %29.51, %30.4 ve %29 verimlere sahip oldukları hesaplanmıştır. HC ve CO emisyonlarının biyodizelerde biraz daha yüksek olduğu saptanmıştır. Duman emisyonları açısından da biyodizellerin motorine göre biraz daha fazla salım yaptığı belirlenmiştir. Biyodizellerin tutuşma gecikmelerinin ve yanma sürelerinin arttığı gözlenmiştir.

He ve Bao (2003) tek silindirli bir dizel motorunda kanola yağı ve motorin karışımlarının termal verim ve performanslarını en iyi şekilde arttıracak ideal karışım oranını saptamak amacıyla yaptıkları çalışmada %30'luk kanola yağı karışımının en iyi sonucu verdiğini saptamışlardır. Bunun yanında püskürtme avansının 2-3° arttırılmasının da yakıt tüketimine olumlu etkileri olduğu belirlenmiştir.

Labeckas ve Slavinskas (2006) dört silindirli direk püskürtmeli doğal emişli bir dizel

motorunda saf kanola biyodizeli ile %5, %10, %20 ve %35 oranlarında motorinle karışımlarını kullanarak yaptıkları araştırmada özgül yakıt tüketimi, termal verim, emisyonlar ve duman açısından karşılaştırmalı bir analiz yapmışlardır. Buna göre saf biyodizelin fren özgül yakıt tüketimleri maksimum momentte 273.5 g/kWh, maksimum güçte 281 g/kWh değerleri motorininkilerden sırasıyla %18.7 ve %23.2 daha yüksektir. Termal verimler açısından kanola 0.356 ile 0.398 arasında değişen değerlere sahipken motorin 0.373 ile 0.383 arasında değerlere sahiptir. En yüksek yakıt enerji içeriği bazlı ekonomi değeri B10 için 9.61 MJ/kWh değeri olarak bulunmuştur.

NOx emisyonları açısından yakıt içindeki oksijen oranıyla doğru orantılı olarak en yüksek değerler 2000 d/d'da elde edilmiştir. En yüksek NOx emisyonu 2132 ppm ile B35 yakıtından gözlenmiştir. Bu değer saf kanola biyodizeli için 2107 ppm olarak ölçülmüştür. CO ve duman emisyonları kanola biyodizeli ile sırasıyla %13.5 ve %60.3 oranında düşüş göstermiştir. HC emisyonları da bütün biyodizel karışımları için 5-21 ppm arasında ölçülmüştür.

Pradeep ve Sharma (2007), jatropha yağı biyodizeli ile sıcak EGR kullanarak NOx emisyonlarının düşürülmesi konusunda yaptıkları çalışmada sıcak EGR ile NOx emisyonlarının %5-25 EGR oranlarında belirgin bir şekilde düşürüldüğünü; duman, HC, CO ve termal verim göz önüne alındığında optimum EGR oranının %15 olması gerektiğini belirtmişlerdir. EGR'den bağımsız olarak yüksek yük şartlarında jatropha yağı biyodizelinin duman salımının motorine göre düşük çıktığı gözlenmiştir. Buna karşın düşük yüklerde biyodizelin duman yoğunluğunun motorine göre daha yüksek çıktığı, CO ve HC emisyonlarının da düşüş gösterdiği belirlenmiştir. Diğer yanma parametrelerinin benzer sonuçlar verdiği kaydedilmiştir.

Dizel motorlarda biyodizel emülsiyonları kullanılarak EGR ile NOx ve duman emisyonlarının düşürülmesi başlıklı araştırmalarında Yoshimoto ve Tamaki (2001) yakıtı emülsifiye etmiş ve soğuk EGR kullanmışlardır. Maksimum güçte gaz yağı ile %30 su emülsiyonu kullanılarak %21 EGR oranında NOx emisyonlarının 191 ppm seviyelerine indiği, performansın çok fazla etkilenmediği neticesine varmışlardır. Bu şartta duman yoğunluğunun %28 oranında arttığı kaydedilmiştir. Maksimum güçte biyodizel ve %30 su emülsiyonu kullanılarak %21 EGR oranında NOx emisyonlarının 170 ppm seviyelerine düştüğü, duman yoğunluğunun kötüleşmediği belirtilmiştir. Su katkısı ve EGR değerlendirme dışı tutulduğunda hava fazlalık katsayısıyla duman yoğunluğu arasında güçlü bir bağıntı olduğu da vurgulanmıştır.

Yang ve Minggao (2003) common rail püskürtme sistemli bir dizel motorda EGR

uygulamasının deneysel araştırması konulu çalışmalarında yüksek hızlı dizel motorları için de EGR uygulamasının NO<sub>x</sub> azaltmada oldukça etkili olduğu sonucuna varmışlardır. %50 EGR oranına kadar yapılan testlerde NO<sub>x</sub> düşüşünün %73 ilâ %88 oranlarında olduğu tespit edilmiştir. Soğuk EGR ile NO<sub>x</sub> düşüşünün sıcak EGR'ye nazaran daha fazla olduğu da ayrıca belirtilmiştir.

PM emisyonlarının EGR yapılarak arttığı, artışın EGR oranının artışıyla sürdüğü kaydedilirken EGR soğutulduğunda PM de düşüş olduğu da belirlenmiştir. Bu arada yüksek EGR oranlarının HC emisyonları çok fazla arttırdığı, bu durumun kısmî yük koşulları daha az etkili olduğu gözlenmiştir.

Marques vd. (2007) biyodizel kullanımında EGR uygulaması ile NO<sub>x</sub> emisyonlarının düşürülmesi konusunda yaptıkları çalışmada yükselen EGR oranlarıyla NO<sub>x</sub> emisyonlarının düştüğünü gözlemiştir. Daha yüksek yüklerde bu düşüşün daha da yüksek olduğu belirtilmiştir. Çalışmadan ortaya çıkan önemli bir gözlem ise bütün biyodizel karışımlarının, motorinin EGR uygulanmadığı durumundaki en düşük salımından daha düşük NO<sub>x</sub> emisyonu meydana getirmesidir. Biyodizel karışımlarına uygulanan EGR ile CO emisyonlarının motorine göre daha düşük çıkması ise yakıttan kaynaklanan fazla oksijene dayandırılmıştır.

Agarwal vd. (2004) EGR'nin egzoz gaz sıcaklığı ve opasitesine olan etkisini inceledikleri çalışmalarında EGR uygulandığında egzoz gaz sıcaklığının etkili bir şekilde düştüğünü gözlemiştirlerdir. Isıl verimin ve fren özgül yakıt tüketimlerinin EGR oranlarından önemli bir şekilde etkilenmediği sonucuna varılmıştır. Artan duman yoğunluğu sebebiyle PM emisyonlarının arttığı kaydedilmiştir.

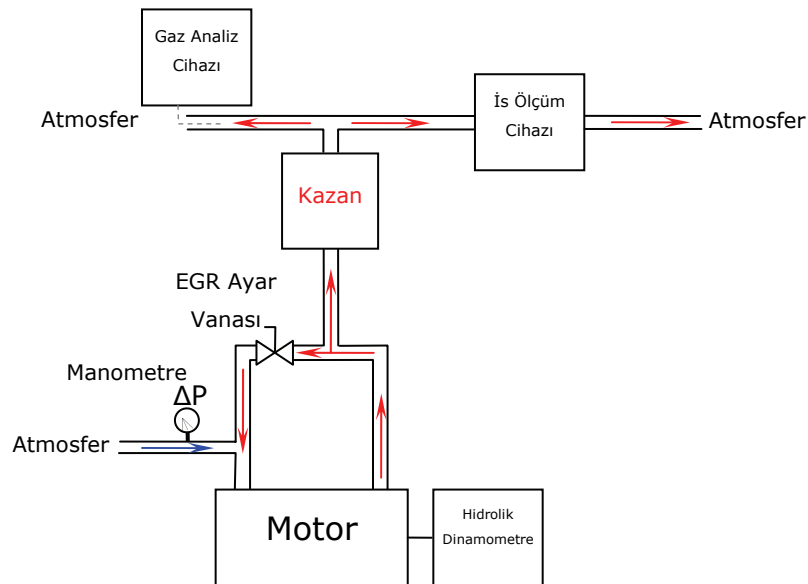
Özkan (2007) biyodizel ve motorinin performans ve emisyonlar yönünde karşılaştırmalı bir analizini yaptığı çalışmada performans açısından kabul edilebilir değişiklikler olduğunu, biyodizelin maksimum güçte %7.5 oranında kaybı, maksimum BMEP değeri açısından da %16'lık bir kaybı olduğunu belirtmiştir. Maksimum güçte yakıt tüketiminin biyodizelde %9.6 mertebesinde arttığı ise çalışmanın bir başka neticesidir.

Emisyonlar açısından bakıldığında CO emisyonlarının motorinden düşük olduğu, minimum salım değerleri arasında %70 oranında bir fark bulunduğu kaydedilmiştir. Motorinin HC emisyonlarının biyodizele göre daha iyi olduğu, NO<sub>x</sub> emisyonlarının da biyodizelde daha fazla olduğu belirtilmiştir. Maksimum güçte NO<sub>x</sub> salımı motorine göre %13-15 daha fazla olmuştur.

## 6. KULLANILAN YÖNTEM VE MATERYALLER

### 6.1 Yöntem

Deney petrol türevli motorin ve kanola biyodizeli yakıtları kullanılarak iki bölümde yapılmıştır. Her iki bölüm için aynı prosedür izlenmiştir. Yakıtların motora konulmasından sonra motor tam gaz konumuna getirilip hidrolik dinamometrenin yük ayarı yapılarak devirin 1000 d/d'ya gelmesi sağlanmıştır. Devir ayarlandıktan sonra emme kanalındaki nozüle bağlanan dijital manometreden emme kanalı ile atmosferik havanın basınç farkı okunarak not edilmiş ve bu değere göre %5, %10, %15 ve %20 EGR oranlarını sağlayacak basınç değerleri hesaplanmıştır. Egzoz kanalından emme kanalına bağlanan borunun üzerinde bulunan EGR vanası elle ayarlanarak dijital manometreden emme kanalı ile atmosferik hava arasındaki basınç farklarının sırasıyla %5, %10, %15 ve %20 EGR oranlarını sağlayacak değerlere gelmeleri sağlanmıştır. EGR oranı ayarlandıktan sonra 3 dakika kadar beklenerek motorun istikrarlı bir emisyon rejimine gelmesi beklenmiştir. Sonra egzoz gazının emisyon değerleri gaz analiz cihazıyla, devir ve moment değerleri deney seti panosundan ve yakıt tüketimi değerleri de dijital osiloskop ile kayda alınmıştır. Bu prosedür hidrolik dinamometreden yük azaltılarak devrin sırasıyla dakikada 1000, 1500, 2000, 2500, 3000 ve 3500 değerleri için tekrarlanmış ve her devir için %0, %5, %10, %15 ve %20 EGR oranlarının değerleri tespit edilmiştir. Yakıt başına toplam 30 adet ölçüm noktası elde edilmiştir.



Şekil 6.1 Deney düzeneğinin genel şeması

Çalışmamızda iki noktadan CO<sub>2</sub> ölçümü yaparak EGR oranını belirlemek yerine emme kanalındaki basınç değişimini ölçerek tek ölçümlü bir EGR hesabı yoluna gidilmiştir. EGR vanası kapalı konumdayken silindirlere alınan taze dolgu yalnızca emme kanalından emilen havadan ibarettir. EGR vanası açıldığında ise taze dolguya egzoz gazları da eklenir. Emme kanalından okunan basınç farkı ise havanın hızının karesiyle orantılıdır.

$$\text{EGR (\%)} = \left( \frac{\dot{m}_{egr}}{\dot{m}_{egr} + \dot{m}_{emme}} \right) \times 100 \quad (6.1)$$

$$\text{EGR (\%)} = \left( 1 - \frac{\dot{m}_{emme}}{\dot{m}_{egr} + \dot{m}_{emme}} \right) \times 100 \quad (6.2)$$

Emme kanalındaki nozüldeki giriş çıkış arasında Bernoulli denklemi yazılacak olursa:

$$\frac{P_1}{\gamma_1} + \frac{V_1^2}{2g} + z_1 = \frac{P_2}{\gamma_2} + \frac{V_2^2}{2g} + z_2 \quad (6.3)$$

$$z_1 = z_2, \gamma_1 = \gamma_2 = \gamma \quad (6.4)$$

$$\frac{P_1 - P_2}{\gamma} + \frac{V_2^2 - V_1^2}{2g} \quad (6.5)$$

$$\Delta P = P_1 - P_2 = \lambda \cdot \frac{V_2^2 - V_1^2}{2g} \quad (6.6)$$

Havanın aynı şart için kütleli debileri eşittir. Bu sebepten EGR yapıldığında taze dolguya eklenen egzoz gazı miktarınca emme kanalından gelen atmosferik havada azalma meydana gelir. Bu da emme kanalından emilen havanın debisini düşürür. Düşen debi ile süreklilik denklemi prensibince havanın hızı azalır.

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_2 = \dot{m} \quad (6.7)$$

$$V_1 A_1 \rho_1 = V_2 A_2 \rho_2 \quad (6.8)$$

Her iki denklemdeki havanın özgül ağırlık değerleri eşit kabul edilerek kütleli debilerin de eşit olduğu kabul edilir. Bu kabul ile denklem şu hale gelir:

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{A_1}{A_2} \quad (6.9)$$

$$\Delta P = \lambda \cdot \frac{V_2^2}{2g} \cdot \left[ 1 - \frac{A_1^2}{A_2^2} \right] \quad (6.10)$$

$$V_2^2 = \Delta P \cdot \left( \frac{2g}{\lambda \cdot \left( 1 - \frac{A_1^2}{A_2^2} \right)} \right) \quad (6.11)$$

Aynı nozül için hava debileri aynı olacağından:

$$\frac{2g}{\lambda \cdot \left( 1 - \frac{A_1^2}{A_2^2} \right)} = sbt \quad (6.12)$$

Süreklilik denkleminde göre hava debisi hızıyla doğru orantılı olduğundan debilerin oranı basınç farklarının kareköküyle orantılıdır:

$$\frac{\dot{m}_{\%0}}{\dot{m}_{\%x}} = \sqrt{\frac{\Delta P_{\%0}}{\Delta P_{\%x}}} \quad (6.13)$$

Herhangi bir EGR yüzdesi için emme kanalındaki taze hava debisi, EGR yapılan egzoz gazı debisi miktarınca azalacağından burada ölçülen basınç farkı da azalacaktır. Bunu şu denklemlerden hesaplayabiliriz:

$$\dot{m}_{\%0} = \left( 1 - \frac{x}{100} \right) \dot{m}_{\%x} \quad (6.14)$$

$$\frac{\dot{m}_{\%0}}{\dot{m}_{\%x}} = \frac{1}{\left( 1 - \frac{x}{100} \right)} \cdot \frac{\Delta P_{\%0}}{\Delta P_{\%x}} \quad (6.15)$$

$$\Delta P_{\%x} = \left( 1 - \frac{x}{100} \right)^2 \cdot \Delta P_{\%0} \quad (6.16)$$

EGR yapılmadan ölçülen basınç farkı değeri bu denklemde yerine yazılarak istenen EGR oranı kolaylıkla hesaplanabilmektedir.

## 6.2 Materyal

### 6.2.1 Yakıtlar

Deneyleerde kullanılan motorin ve kanola biyodizeli piyasadan temin edilen yakıtlardır. Yakıtların analiz değerleri aşağıda verilmiştir. Biyodizel yakıtının analizi Tübitak Marmara Araştırma Merkezi Enerji Enstitüsü tarafından yapılmıştır.

Çizelge 6.1 Kanola biyodizel yakıtının analiz neticeleri

Analiz	Birim	Analiz Sonucu	EN 14214'e göre Limit Değerleri		Analiz Metodu
			En az	En Çok	
Özgül Kütle (15°C)	gr/cm <sup>3</sup>	886.8	860	900	ISO 12185
Viskozite (40°C)	cSt	5.8829	3.5	5.0	EN ISO 3104
Parlama Noktası	°C	175.5	120	-	EN ISO 3679
Kükürt Muhtevası	mg/kg	10	-	10.0	ISO 20846
Karbon Kalıntısı	% (m/m)	<0.1	-	0.30	EN ISO 10370
Setan Sayısı	Hesaplanan	56.9	51.0	-	EN ISO 5165
Su	mg/kg	>1000	-	500	EN ISO 12937
Toplam Kirlilik	mg/kg	14.9	-	24	EN 12662
Asit Sayısı	mg KOH/g	>1	-	0.50	EN 14104
İyot Sayısı	g iyot/100 g	89	-	120	EN 14111
Ester Muhtevası	% (m/m)	79.59	96.5	-	EN 14103
Linolenik Asit metil esteri	% (m/m)	1.99	-	12	EN 14103
Doymamış metil esteri (>= 4 çift bağ)	% (m/m)	0	-	1	EN 14103
Metanol muhtevası	% (m/m)	0.01	-	0.20	EN 14110
Monogliserid muhtevası	% (m/m)	0.63	-	0.80	EN 14105
Digliserid muhtevası	% (m/m)	>0.64	-	0.20	EN 14105
Trigliserid muhtevası	% (m/m)	>0.62	-	0.20	EN 14105
Serbest gliserol	% (m/m)	0.01	-	0.02	EN 14105
Toplam gliserol	% (m/m)	1.64	-	0.25	EN 14105
Oksidasyon kararlılığı, 110 °C	saat	1	6.0	-	EN 14112
Net Yanma Isısı	Mj/kg	37.26	35	-	ASTM D 240 hesap ile
Karbon tayini	% (m/m)	76.43	-	-	Elementel analiz cihazı ile
Hidrojen tayini	% (m/m)	11.44	-	-	Elementel analiz cihazı ile
Azot tayini	% (m/m)	<1	-	-	Elementel analiz cihazı ile

Çizelge 6.2 Motorin yakıtının analiz neticeleri

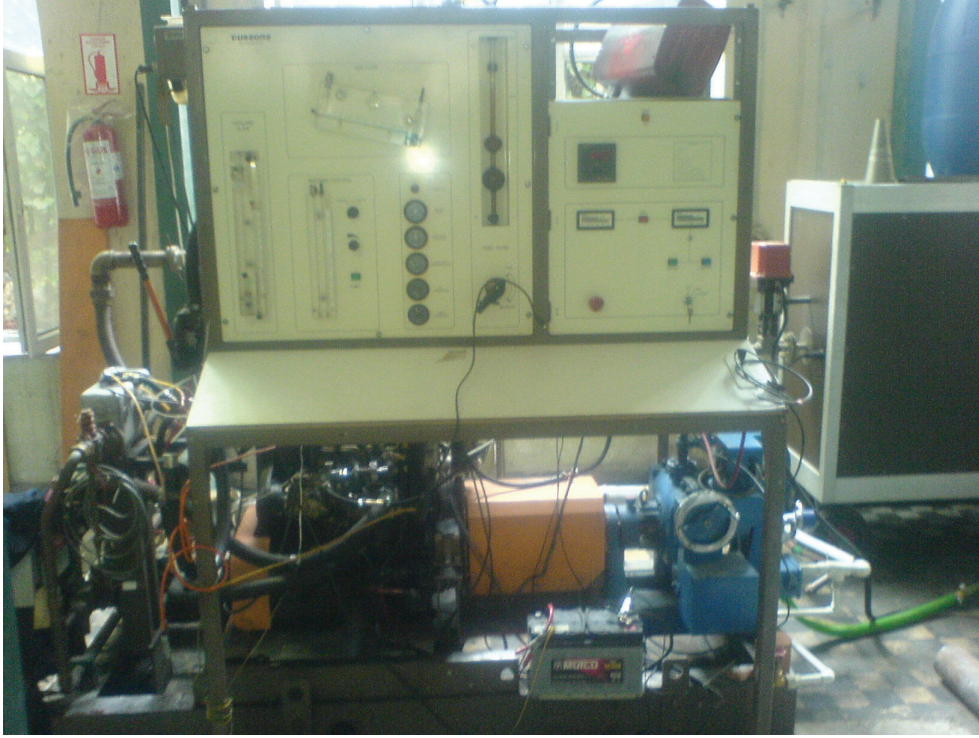
Analiz	Birim	Analiz Sonucu	Limit Değerleri		Analiz Metodu
			En az	En Çok	
Özgül Kütle (15°C)	gr/cm <sup>3</sup>	886.8	820	860	ASTM D4052
Viskozite (40°C)	cSt	2.812	2.0	4.5	ASTM D445
Net Yanma Isısı	Mj/kg	42.55	-	-	Hesaplanan
Kükürt Muhtevası	mg/kg	1471	-	7000	ASTM D93
Parlama Noktası	°C	66	55	-	ASTM D2622
Setan Sayısı	Hesaplanan	51.4	46.0	-	ASTM D4737
Su	mg/kg	98	-	200	ASTM D6304
SFTN	°C	-20	-15 (kış)	-	IP

### 6.2.2 Motor ve yükleme seti

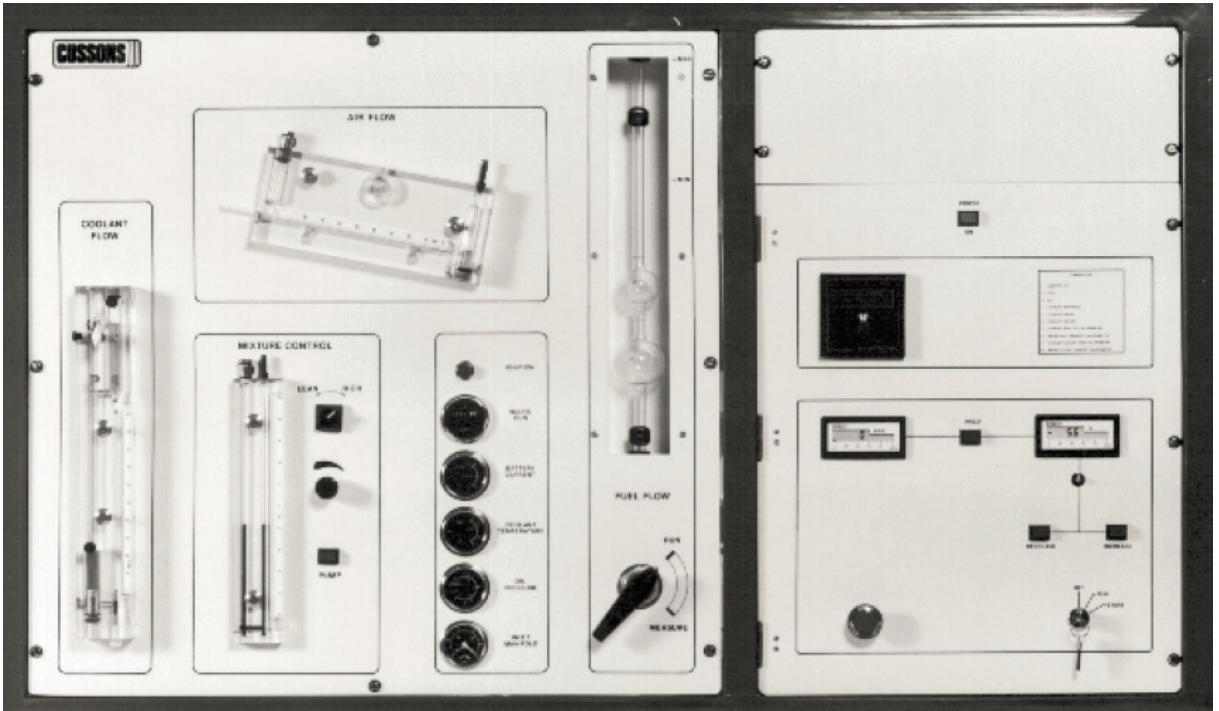
Çalışmamızda kullandığımız deney düzeneği Cussons Technology marka P8600 numaralı bir test düzeneğidir. Düzeneğin motoru; P8622 nolu, 4 silindirli, 1.8 litre hacminde turboşarjlı, ön yanma odalı ve indirek püskürtmeli Ford XLD418T kodlu dizel motorudur. Motor 3500 d/d'da 36 kW güç, 2500 d/d'da 110 Nm moment üretmektedir. Motora P8601 nolu hidrolik dinamometre ile yük uygulanmaktadır. Yükleme seti 9000 d/d'ya kadar çalışabilmektedir ve azami yükleme kapasitesi 112 kW'tır.

Çizelge 6.3 Dizel motorun teknik özellikleri

Motor Tipi	4 stroklu, sua soğutmalı, indirek püskürtmeli, turboşarjlı
Silindir Sayısı	Sıralı 4 silindir
Çap	82.5 mm
Strok	82.0 mm
Motor Hacmi	1753 cm <sup>3</sup>
Sıkıştırma Oranı	21.5:1
Maksimum Güç	36 kW (3500 d/d)
Maksimum Moment	110 Nm (2500 d/d)



Şekil 6.2 Cussons Technology P8600 test düzeneği, motoru ve yükleme seti



Şekil 6.3 Cussons Technology P8600 test düzeneği kontrol panosu

### 6.2.3 Ölçüm cihazları

Egzoz gazının absorplama katsayısı ve opasitesinin ölçümünde AVL marka DiCom 4000 model gaz analiz cihazı ve buna bağlı DiSmoke 4000 cihazları kullanılmıştır. Bu cihaz opasite değerini % 0.1 hata ile % 0 ilâ 100 değerleri aralığında, absorplama katsayısını ise  $0.01 \text{ m}^{-1}$  hata ile  $0 \text{ ilâ } 100 \text{ m}^{-1}$  değerleri arasında ölçmektedir.



Şekil 6.4 AVL DiTEST DiCom 4000 emisyon analiz cihazı

Egzoz emisyon gazlarının ölçümünde de AVL DiTEST Dicom 4000 emisyon analiz cihazı kullanılmıştır. Bu cihazla CO, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, HC, NO<sub>x</sub> ve lamda değerleri ölçülebilmektedir.

Çizelge 6.4 Gaz analiz cihazının ölçüm aralığı ve hassasiyeti

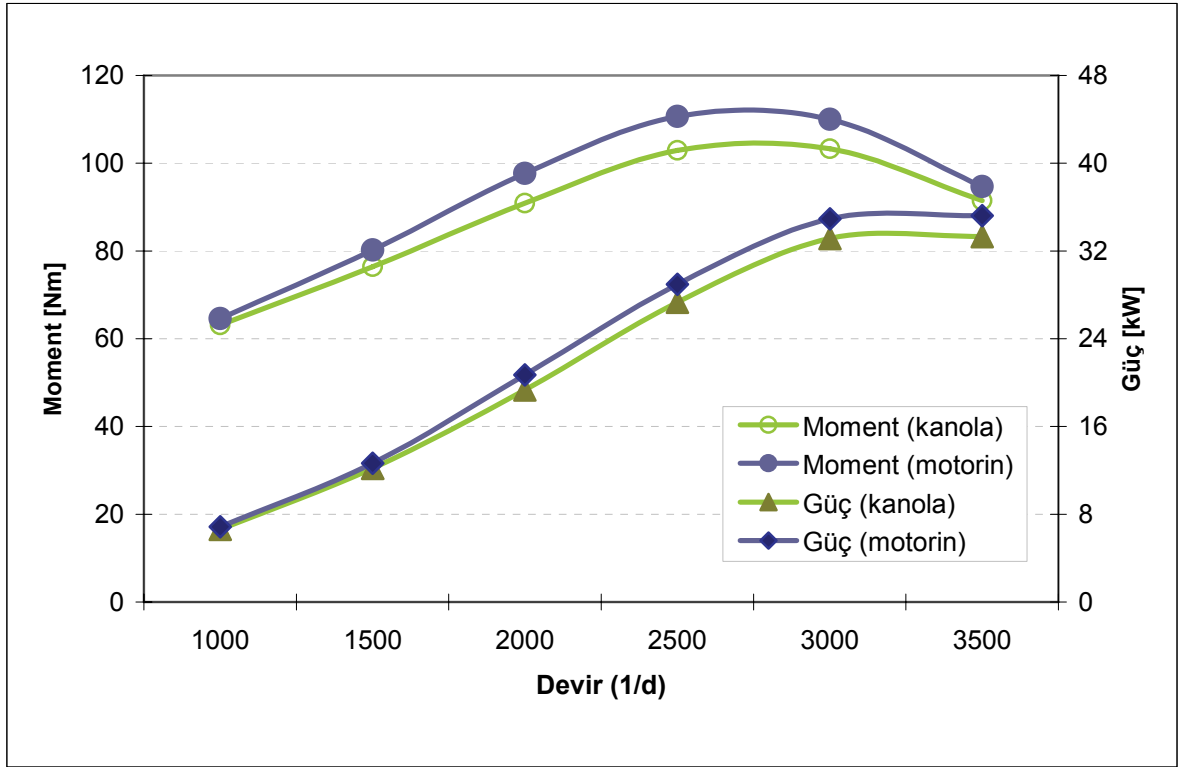
AVL DiCom 4000	Ölçüm Aralığı	Hassasiyet
CO	0 - 10 (% hacim)	0.01 (% hacim)
CO <sub>2</sub>	0 - 20 (% hacim)	0.1 (% hacim)
HC	0 – 20,000 (ppm hacim)	1 (ppm)
NO <sub>x</sub>	0 – 5,000 (ppm hacim)	1 (ppm)
O <sub>2</sub>	0 - 25 (% hacim)	0.01 (% hacim)
$\lambda$ (hesaplanan)	0 – 9.999	0.001
Opasite	0 - 100 (%)	0.1 (%)
Absorplama katsayısı (k)	0 – 99.99 ( $\text{m}^{-1}$ )	0.01 ( $\text{m}^{-1}$ )

Emme kanalındaki basınç farklarını ölçmek amacıyla 1 mbar hassasiyetli dijital bir manometre kullanılmıştır. Yakıt debisi ve silindir içi maksimum basınçları ise LeCroy marka dijital bir osiloskop kullanılarak kaydedilmiştir.

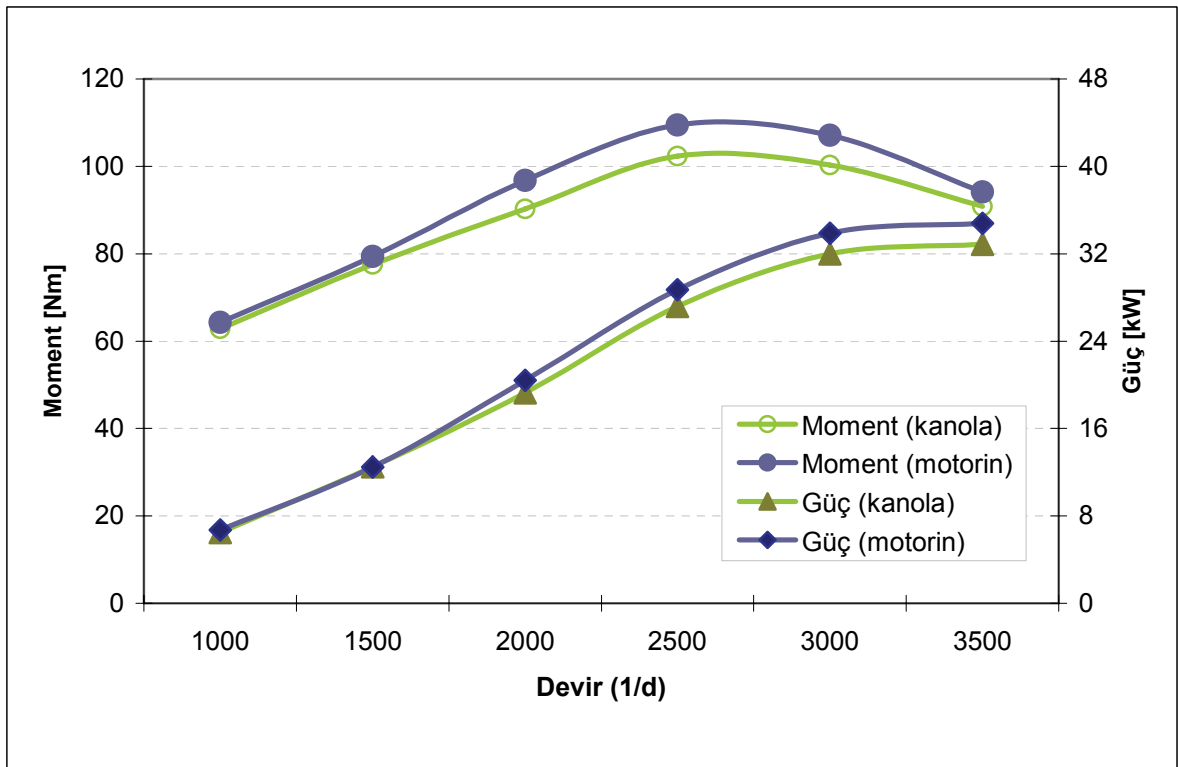
## 7. DENEY SONUÇLARI

Deney temelde her iki yakıt için aynı prosedür kullanılarak her bir devir için 5 ayrı EGR oranında, toplam 6 ayrı yük/devir şartı için 30 noktadan ölçüm yapılarak yürütülmüştür. Bu kısımda performans ve yakıt tüketimi, NO<sub>x</sub> emisyonları, CO emisyonları, HC emisyonları, is emisyonları ve kirletici harici gaz emisyonlarının grafikleri ayrı bölümler halinde verilmiştir. Bir sonraki bölümde ise karşılaştırmalı ve toplu grafikler ile nihai analizler yapılarak veriler irdelenmiştir.

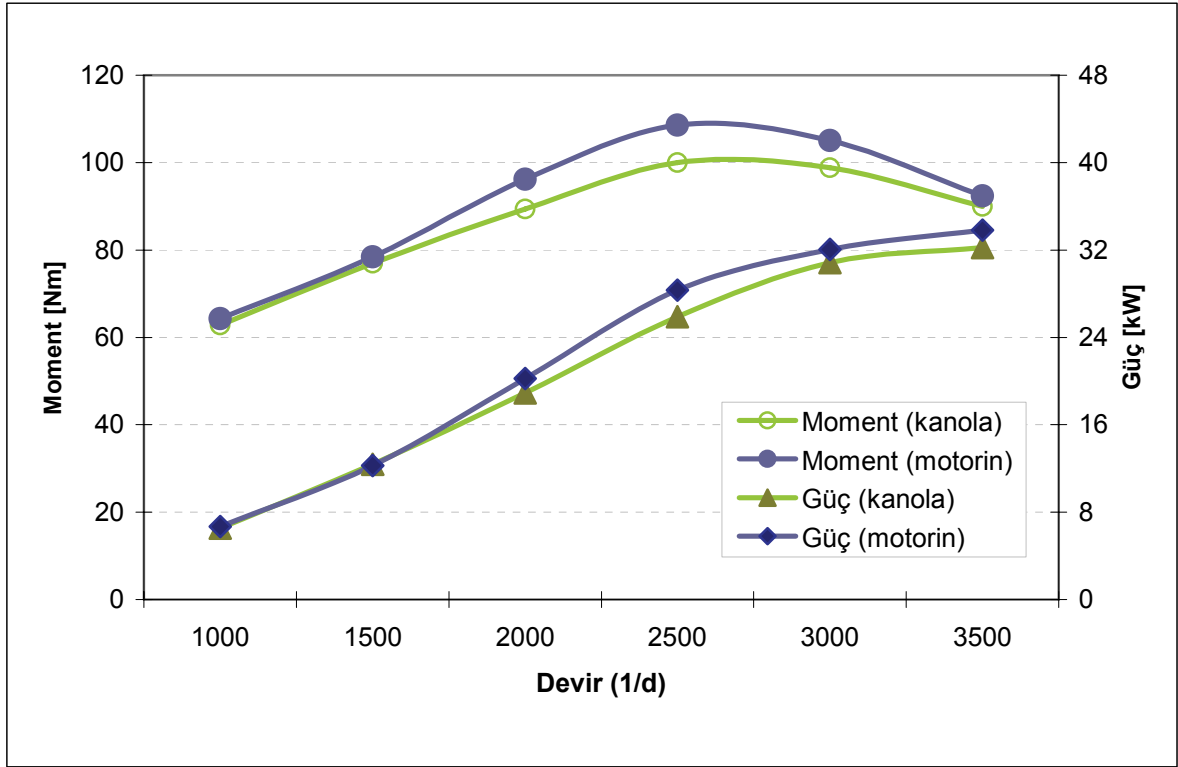
## 7.1 Performans Grafikleri



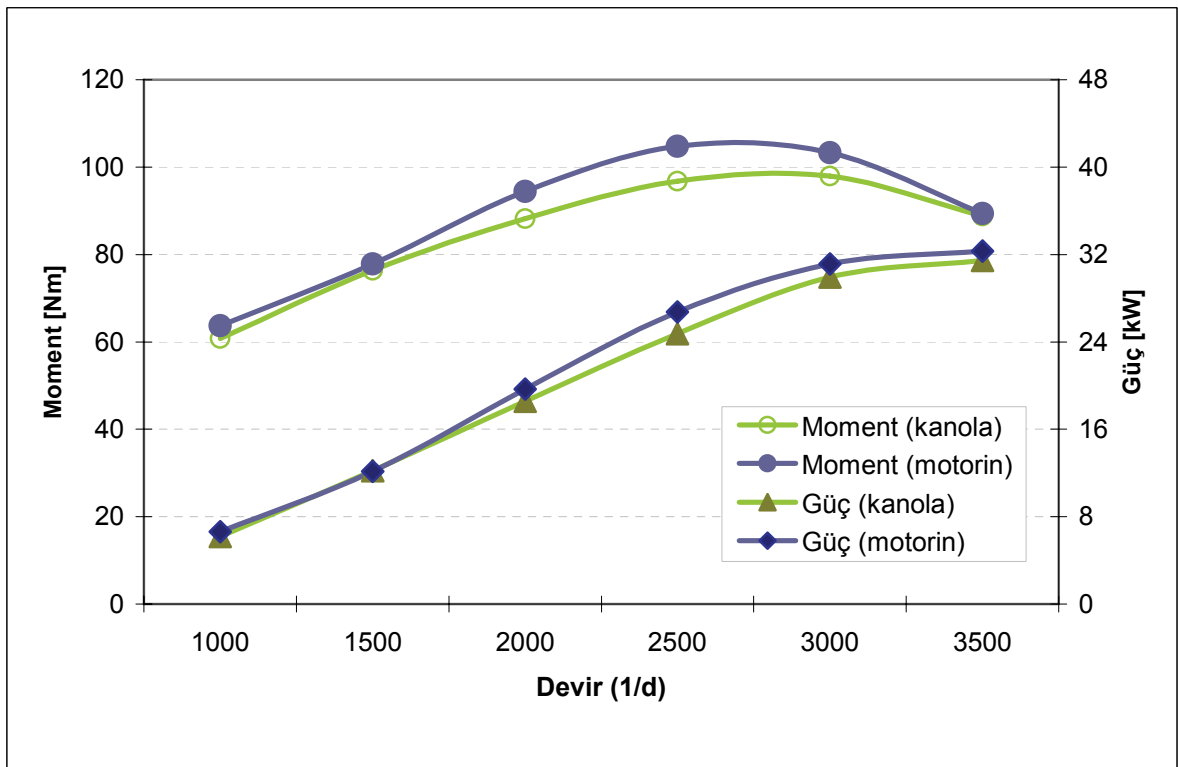
Şekil 7.1 Güç ve moment değerlerinin devirlere göre değişimi (%0 EGR)



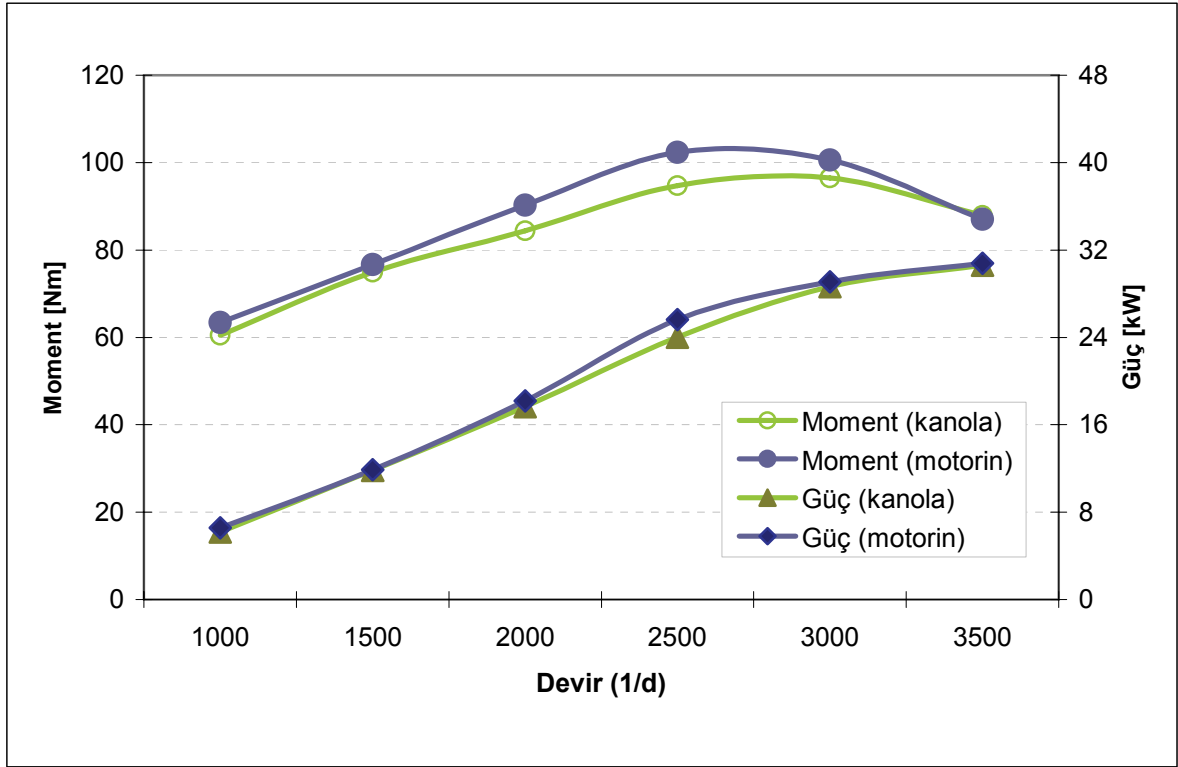
Şekil 7.2 Güç ve moment değerlerinin devirlere göre değişimi (%5 EGR)



Şekil 7.3 Güç ve moment değerlerinin devirlere göre değişimi (%10 EGR)

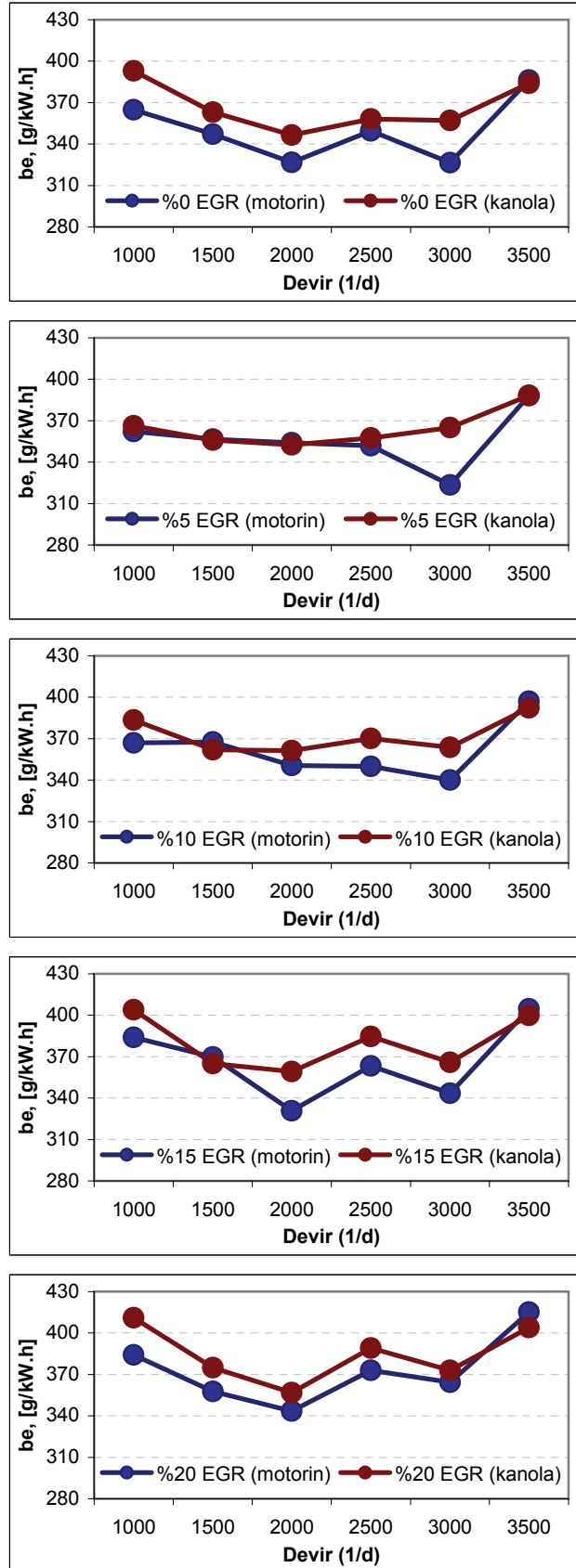


Şekil 7.4 Güç ve moment değerlerinin devirlere göre değişimi (%15 EGR)



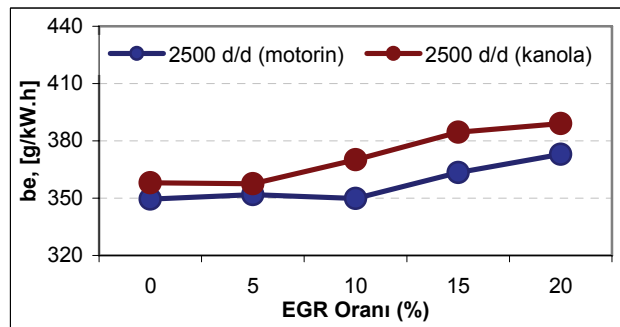
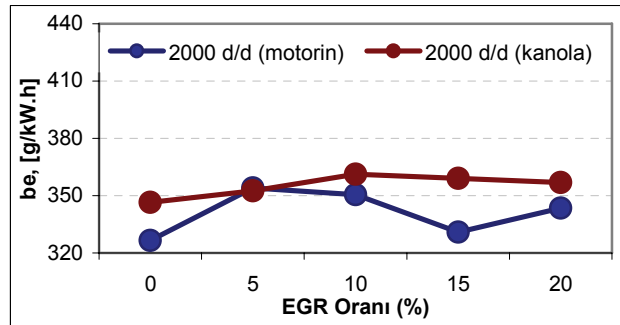
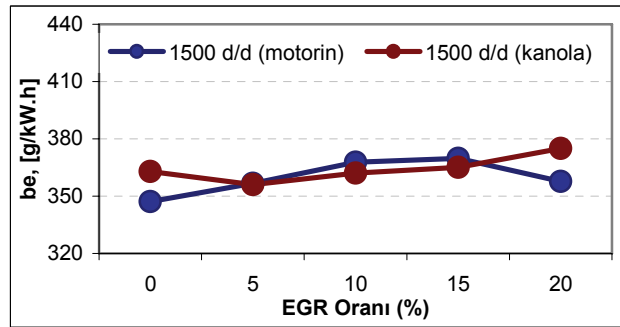
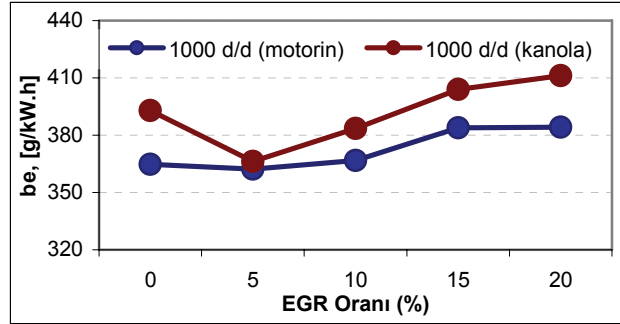
Şekil 7.5 Güç ve moment değerlerinin devirlere göre değişimi (%20 EGR)

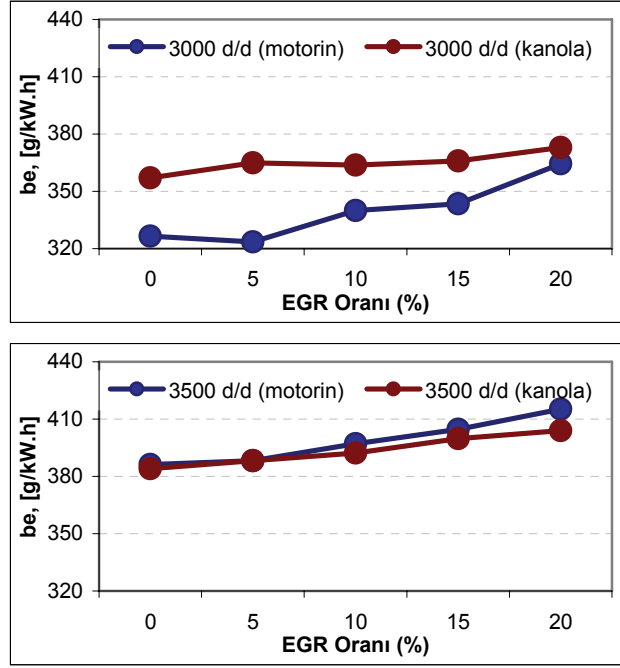
Çalışmamızda kullandığımız motorinin ısı içeriği 42.55 Mj/kg, kanola biyodizelinin ise 37.26 Mj/kg'dır. Bu da ısı içerik bakımından motorinin biyodizelininkinden %14 civarında avantajı olduğunu gösterir. Bu avantaj moment değerlerine 1000 d/d hızında %2.34 – 4.88 olarak yansırken maksimum momente doğru artarak en yüksek değerine maksimum moment devri olan 2500 d/d'da ulaşarak %7.45 – 8.55 mertebelerine yükselir. Güç eğrilerine bakılacak olursa motorinin kanoladan daha fazla güç ürettiği görülür. Aradaki fark momentten dolayı yine maksimum moment devri ve civarında en yüksek değerine ulaşır. Bir diğer netice ise kanoladan elde edilen moment eğrisinin paralele daha yakın olduğudur. Devirlere bağlı moment farkı kanolada daha az iken bu EGR oranı arttıkça daha barizleşmektedir.



Şekil 7.6 Bütün EGR oranlarına göre özgül yakıt tüketimi değişimi

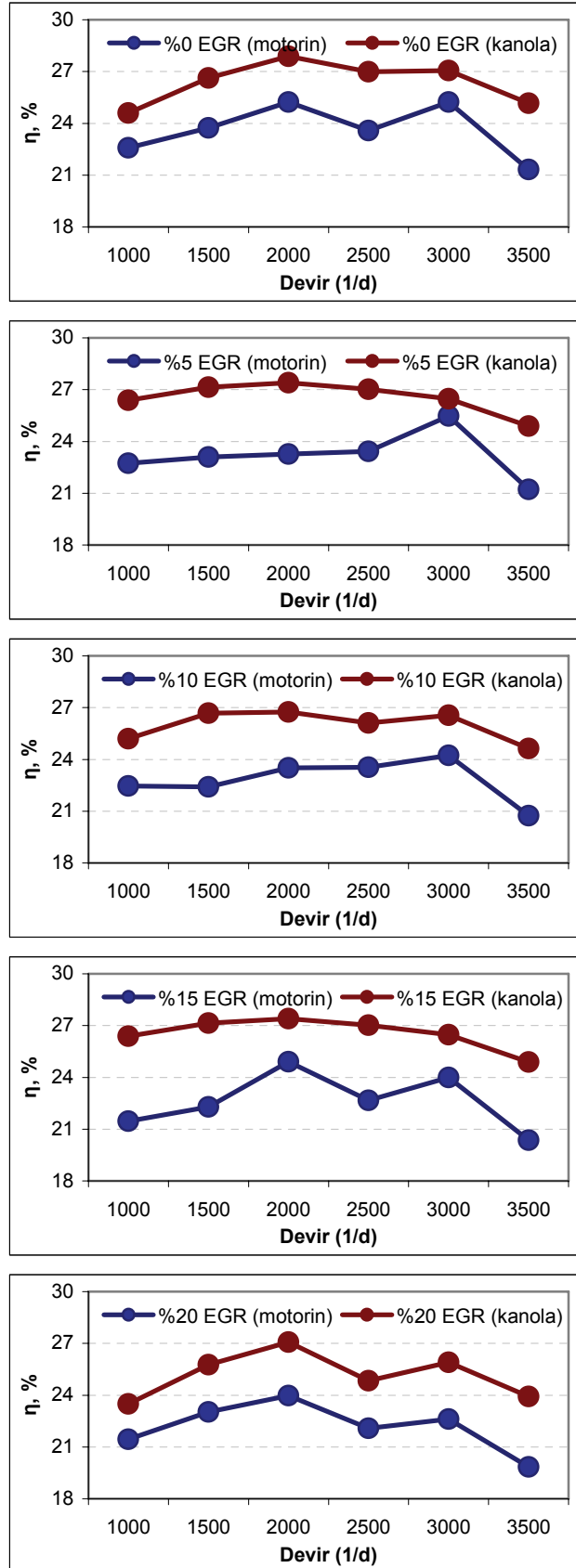
Bütün EGR oranlarında kanola yakıtı özgül yakıt tüketimi açısından motorine göre daha yüksek değerler sahiptir. Veriler dikkatlice incelendiğinde 2000 ve 3000 d/d hızlarında hemen tamamında yakıt tüketimi açısından eğriler minimum noktaları oluşturmuştur. Bunların arasında kalan maksimum moment devrinde ise yakıt tüketimi zikredilen hızlardan daha fazla olmuştur.



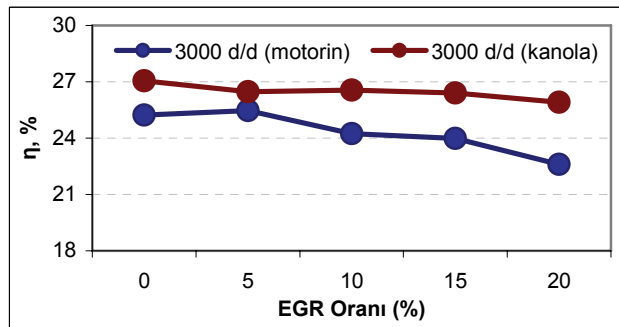
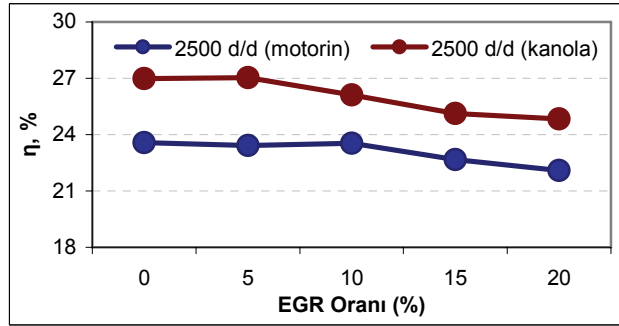
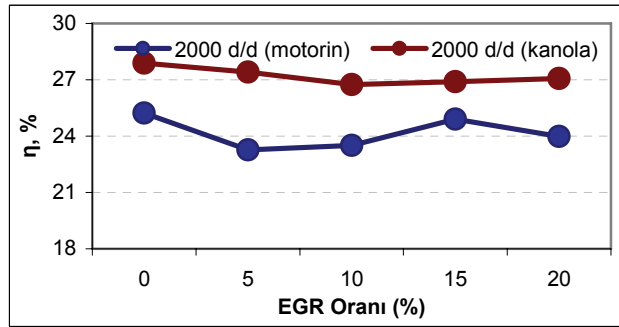
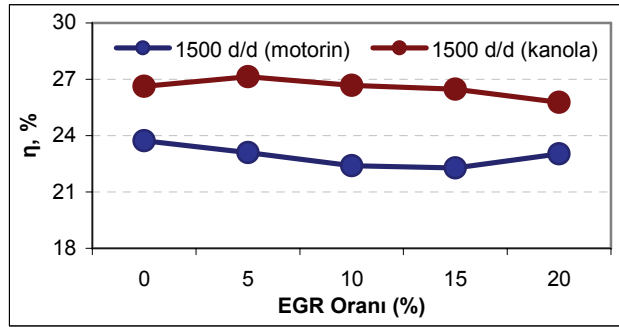
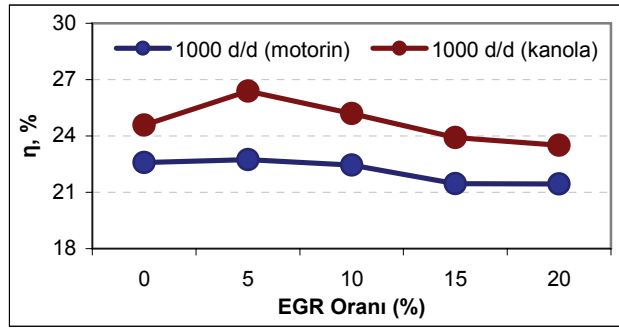


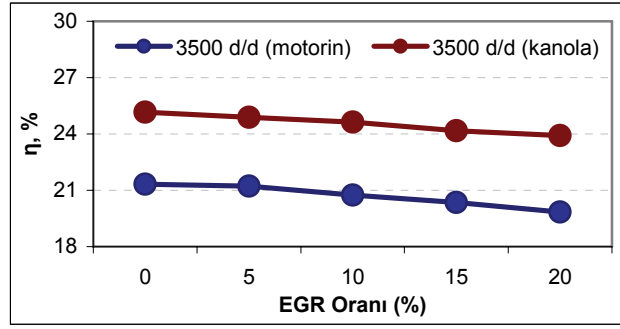
Şekil 7.7 Bütün devirlere göre özgül yakıt tüketimi değişimi

Bilhassa düşük devirlerde kanola yakıtının %5 EGR oranıyla özgül yakıt tüketimi açısından EGR'siz duruma göre daha avantajlı olduğu görülüyor. Bununla birlikte her iki yakıtın özgül yakıt tüketimleri artan EGR oranlarıyla artış sergiliyor. EGR artışıyla birlikte motorinin özgül yakıt tüketimi dalgalı bir hal alırken bu durum kanola biyodizeline daha istikrarlı bir karakter arz etmektedir. Bu durumun; yakıtın oksijence zengin olmasından dolayı EGR'den kaynaklanan oksijence fakir karışım elde edilmesinden daha az etkilenmesine bağlı olduğu kuvvetle muhtemeldir.



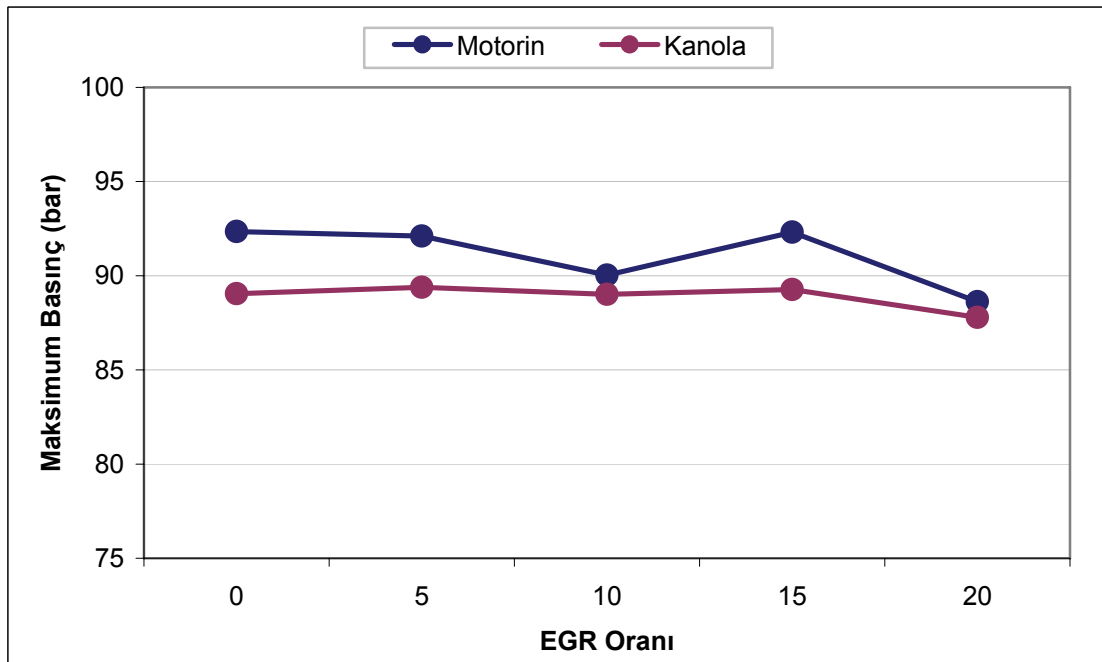
Şekil 7.8 Bütün EGR oranlarına göre termik verim değişimi





Şekil 7.9 Bütün devirlere göre termik verim değişimi

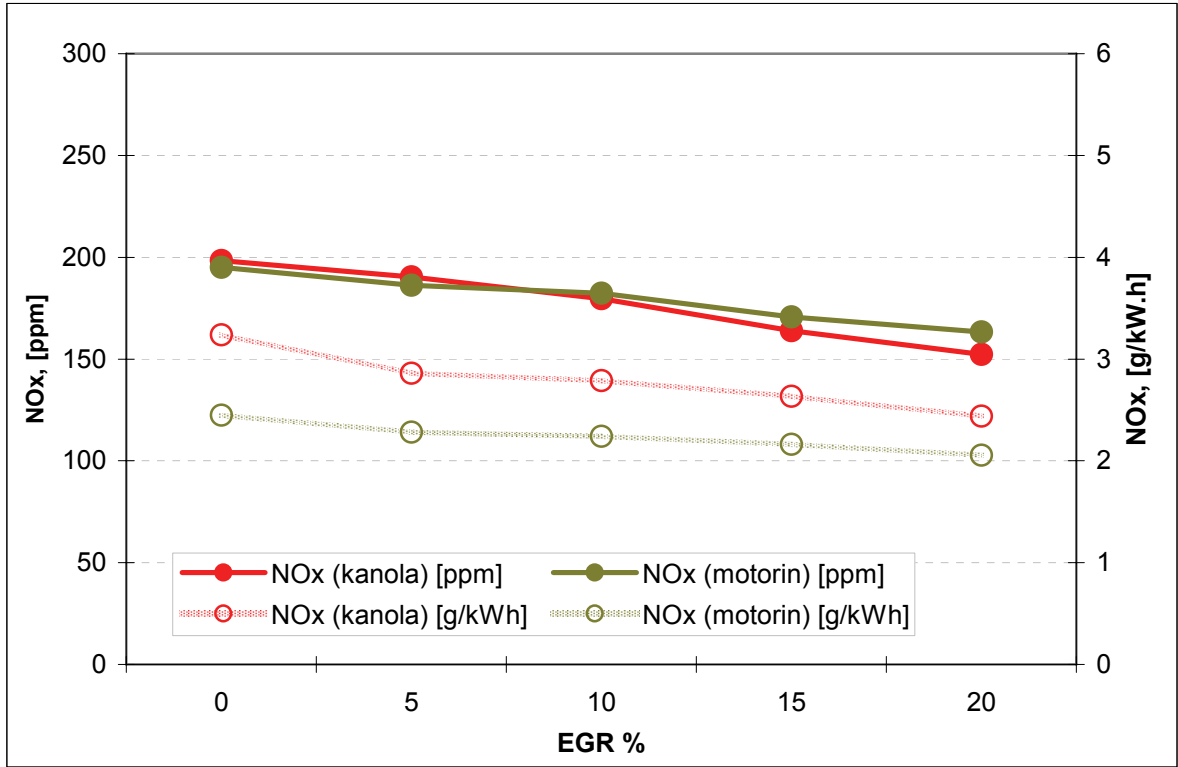
Isıl değer bakımından motorinden daha düşük değerlere sahip kanolanın daha yüksek termik verime sahip olması sadece yüksek yanma verimiyle açıklanabilir. Bu da oksijen içeriğiyle alakalıdır. 3500 d/d hızında kanolanın termik verimi ortalama %3.85 daha yüksektir. Bu değer %20 EGR oranında %4.07'ye kadar çıkmıştır.



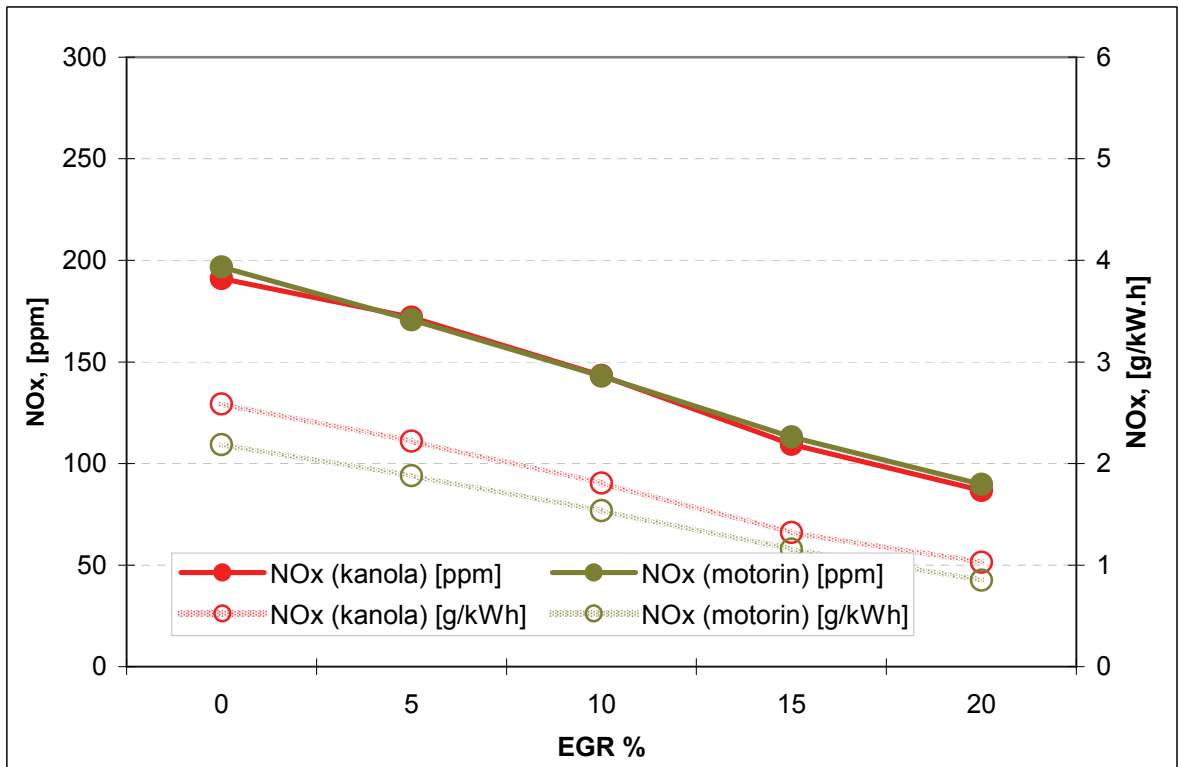
Şekil 7.10 EGR oranlarının maksimum silindir basınçlarına etkisi

Maksimum silindir basınçlarıyla alakalı maksimum moment devri olan 2500 d/d'daki değerlere bakıldığında motorinin maksimum basınç değerlerinin bütün EGR oranlarında daha yüksek olduğu görülmektedir. Bu netice Özkan (2007) ve Balcı'nın (2005) çalışmalarıyla paraleldir. %0 EGR oranında biyodizelin basıncı motorinden %3.9 daha düşük çıkmıştır. Biyodizelde düşük EGR oranlarında önemli bir değişim görülmezken %20 EGR oranında bir miktar düşüş görülmüştür.

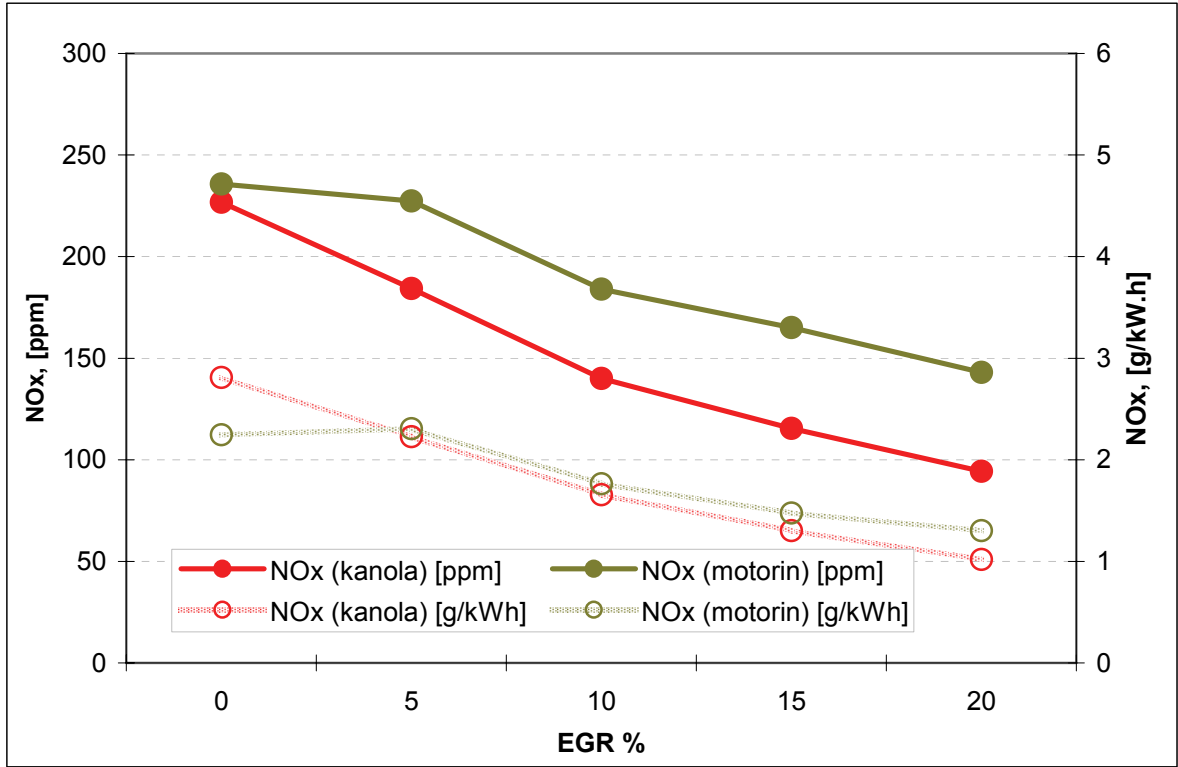
## 7.2 NO<sub>x</sub> Emisyon Grafikleri



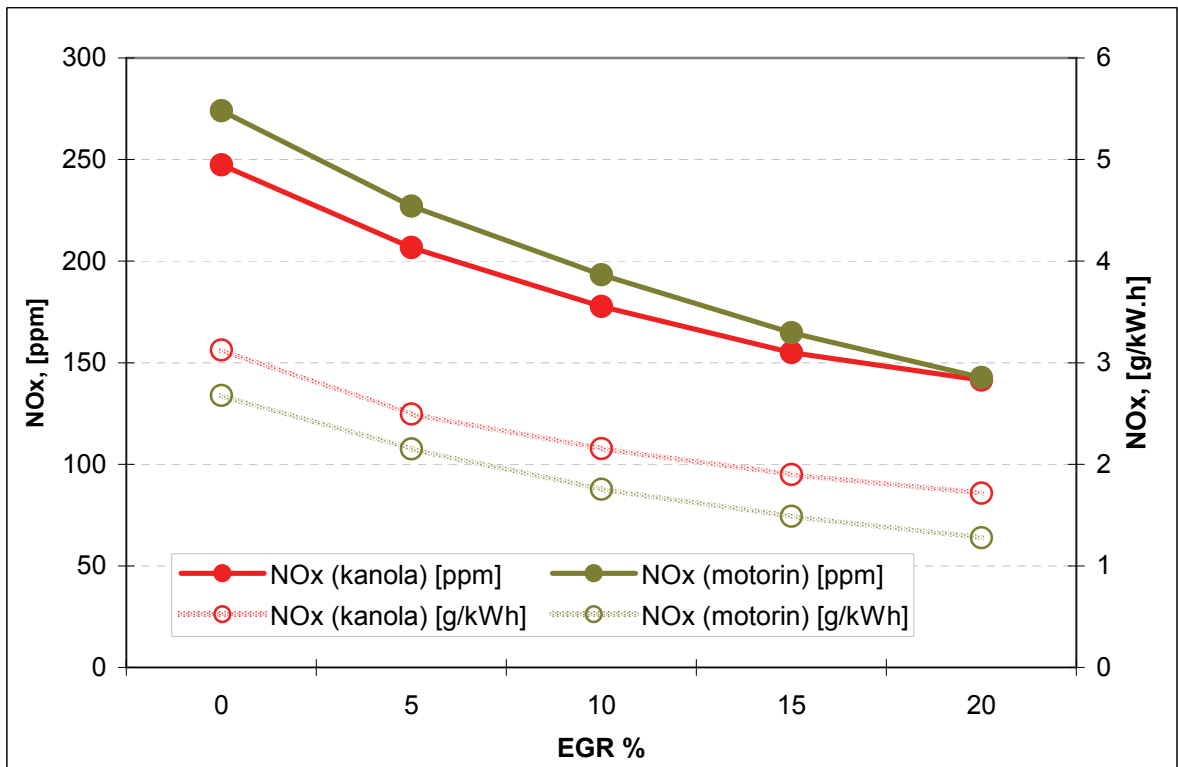
Şekil 7.11 NO<sub>x</sub> emisyonlarının EGR oranına göre değişimi (1000 d/d)



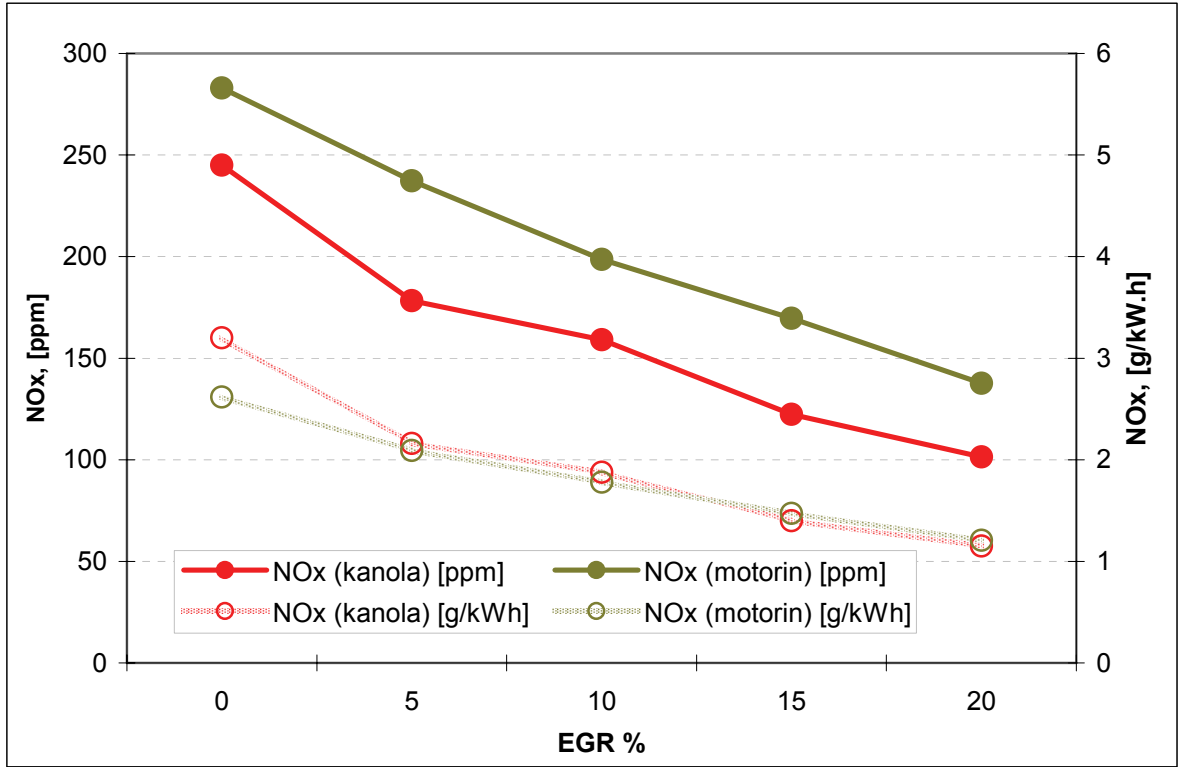
Şekil 7.12 NO<sub>x</sub> emisyonlarının EGR oranına göre değişimi (1500 d/d)



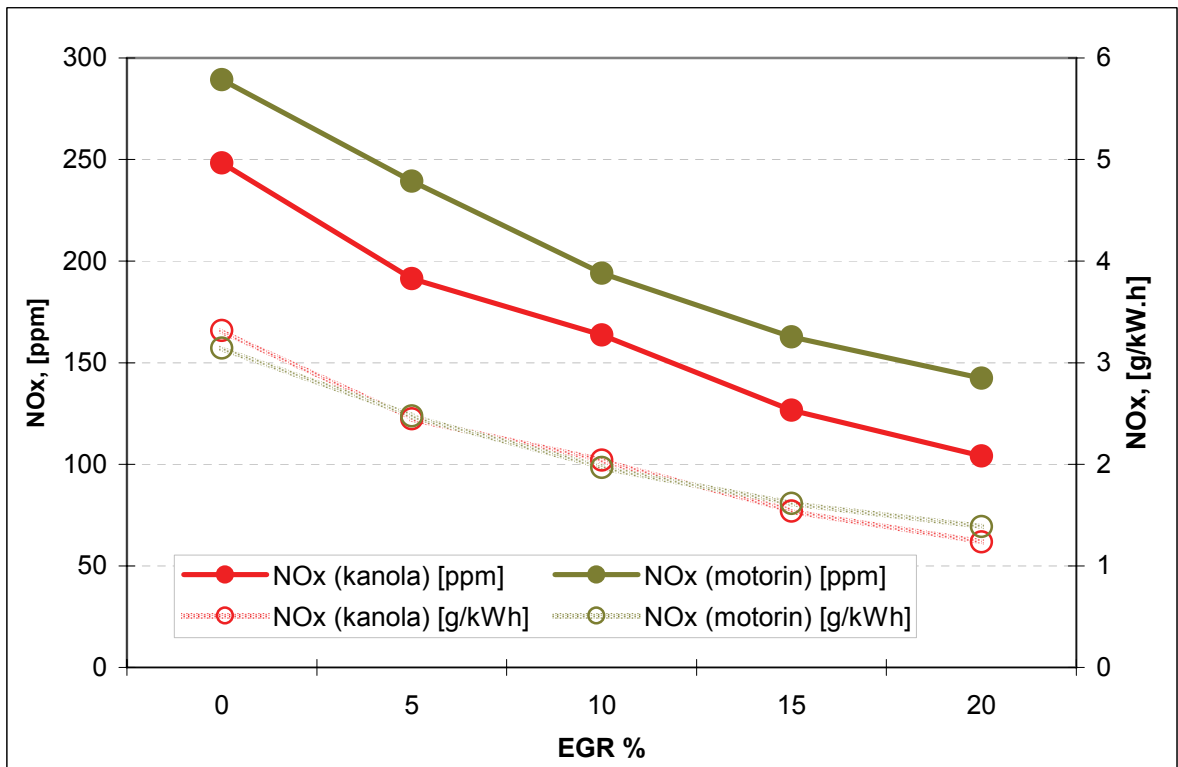
Şekil 7.13 NO<sub>x</sub> emisyonlarının EGR oranına göre değişimi (2000 d/d)



Şekil 7.14 NO<sub>x</sub> emisyonlarının EGR oranına göre değişimi (2500 d/d)



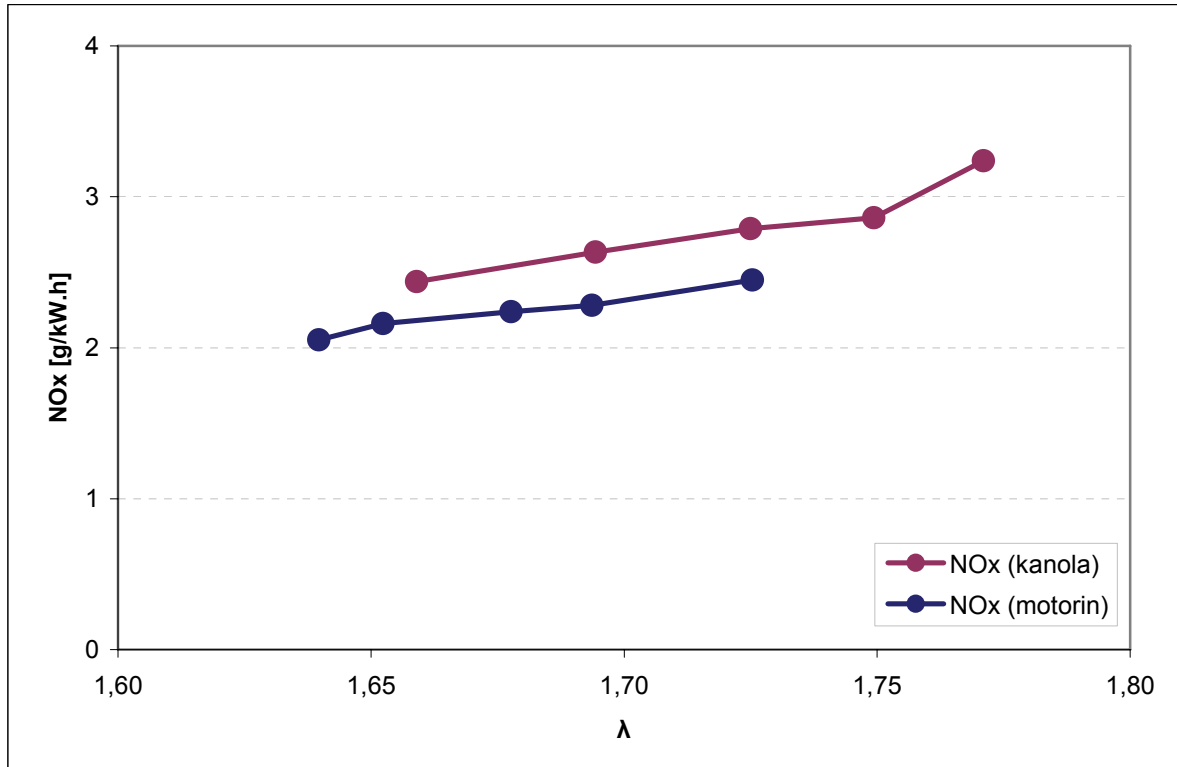
Şekil 7.15 NO<sub>x</sub> emisyonlarının EGR oranına göre değişimi (3000 d/d)



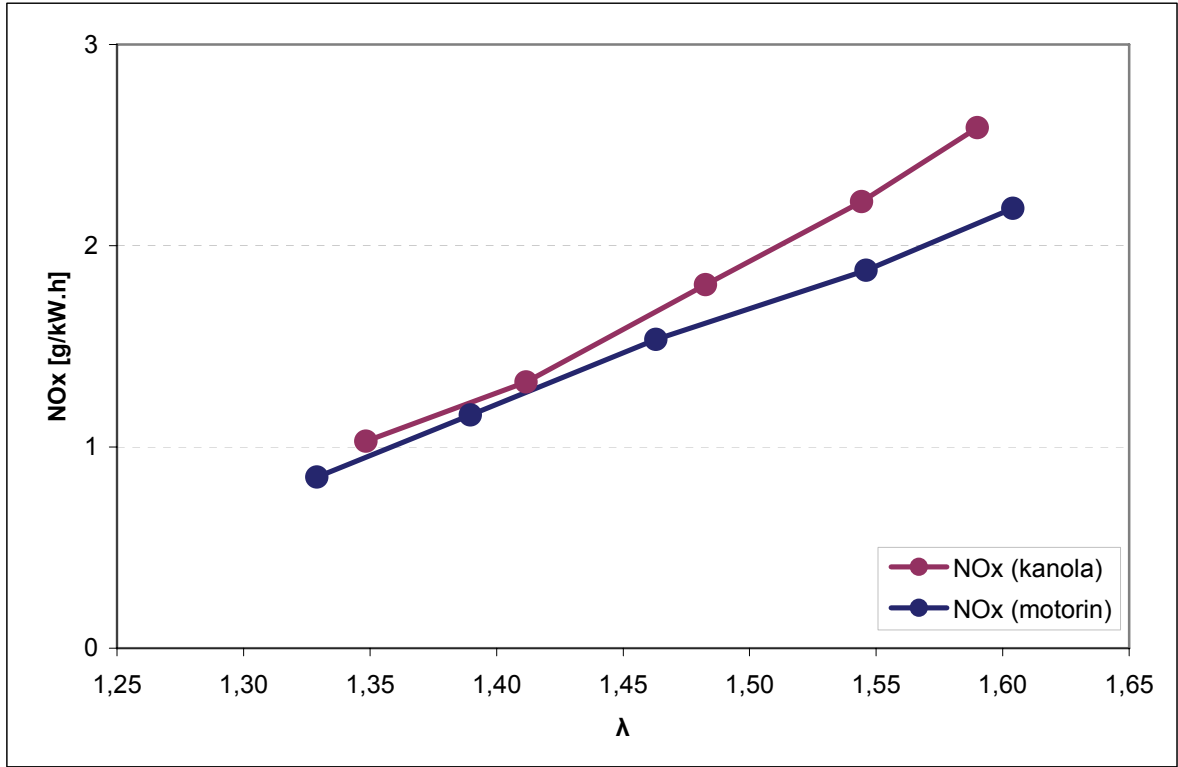
Şekil 7.16 NO<sub>x</sub> emisyonlarının EGR oranına göre değişimi (3500 d/d)

EGR oranının artmasıyla her iki yakıt için NO<sub>x</sub> emisyonlarında ciddi düşüşler meydana geldiği kolayca görülebilmektedir. Hacimsel emisyon salımları açısından düşük devirler için her iki yakıtın birbirine yakın neticeler vermesine rağmen 2000 d/d ve üzeri devir şartlarında motorinin daha yüksek miktarlarda NO<sub>x</sub> saldığı gözlenmiştir. Buna rağmen özgül gaz emisyonları açısından kanola yakıtının salım değerleri bilhassa düşük devirlerde daha yüksek olmuştur. Bütün devirler göz önüne alındığında EGR oranına bağlı olarak emisyon değişimleri her iki yakıt için paralele yakın bir azalma eğilimi göstermektedir. Devir sayısı arttıkça azalma miktarı artmakta, en yüksek devirde maksimum azalma kaydetmektedir.

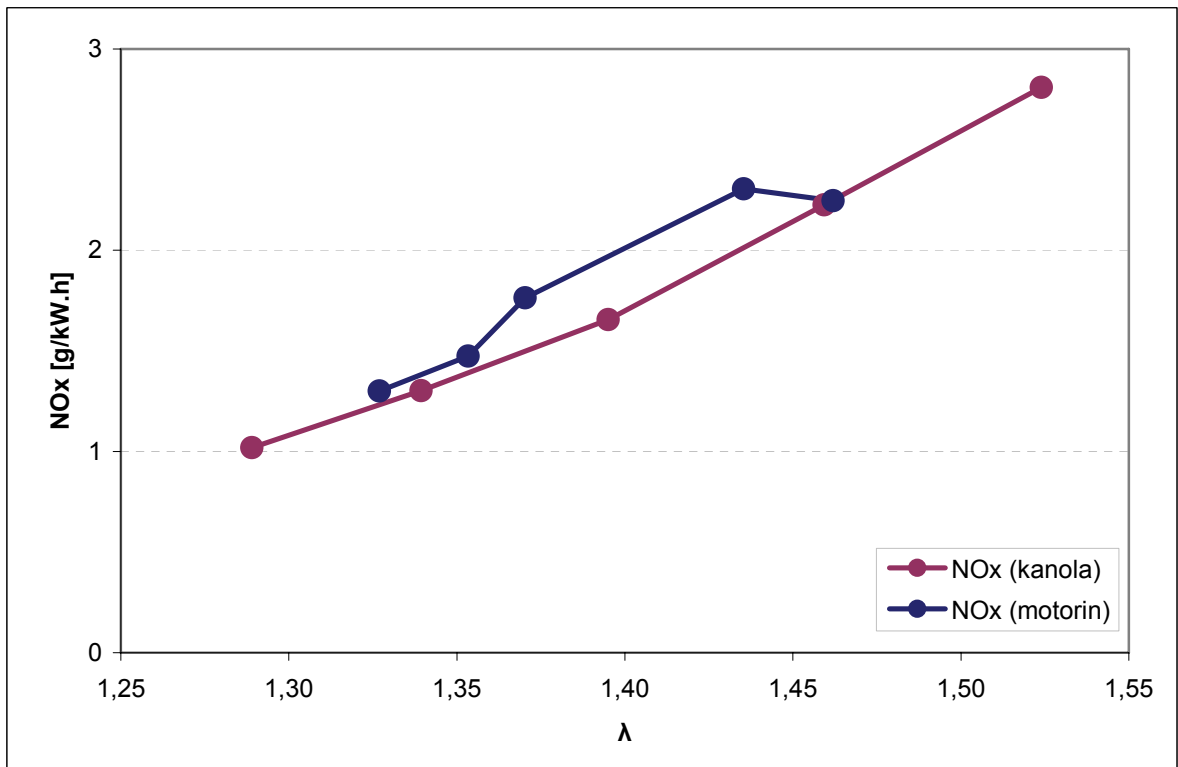
Kanola yakıtı kullanıldığında %20 EGR oranıyla NO<sub>x</sub> emisyonları %64'e kadar, motorin için %61 oranına kadar düşüşler kaydedilmiştir.



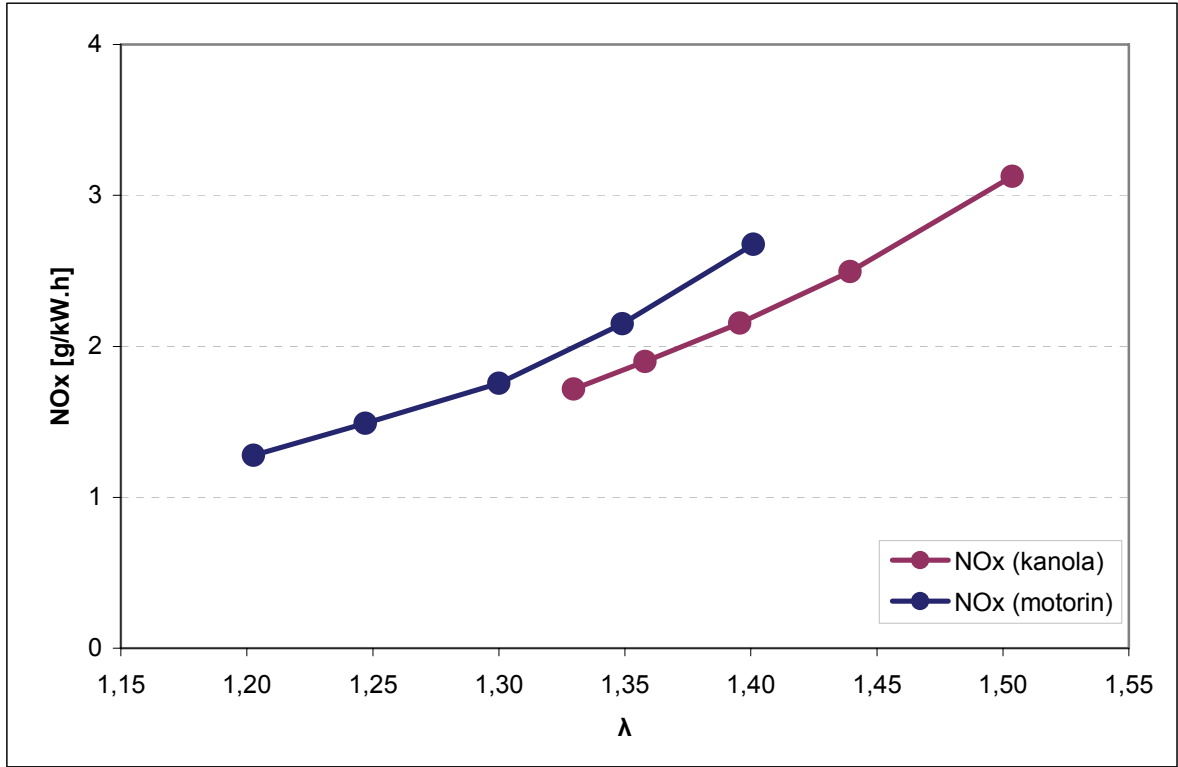
Şekil 7.17 HFK'ya bağlı NO<sub>x</sub> emisyonlarının değişimi (1000 d/d)



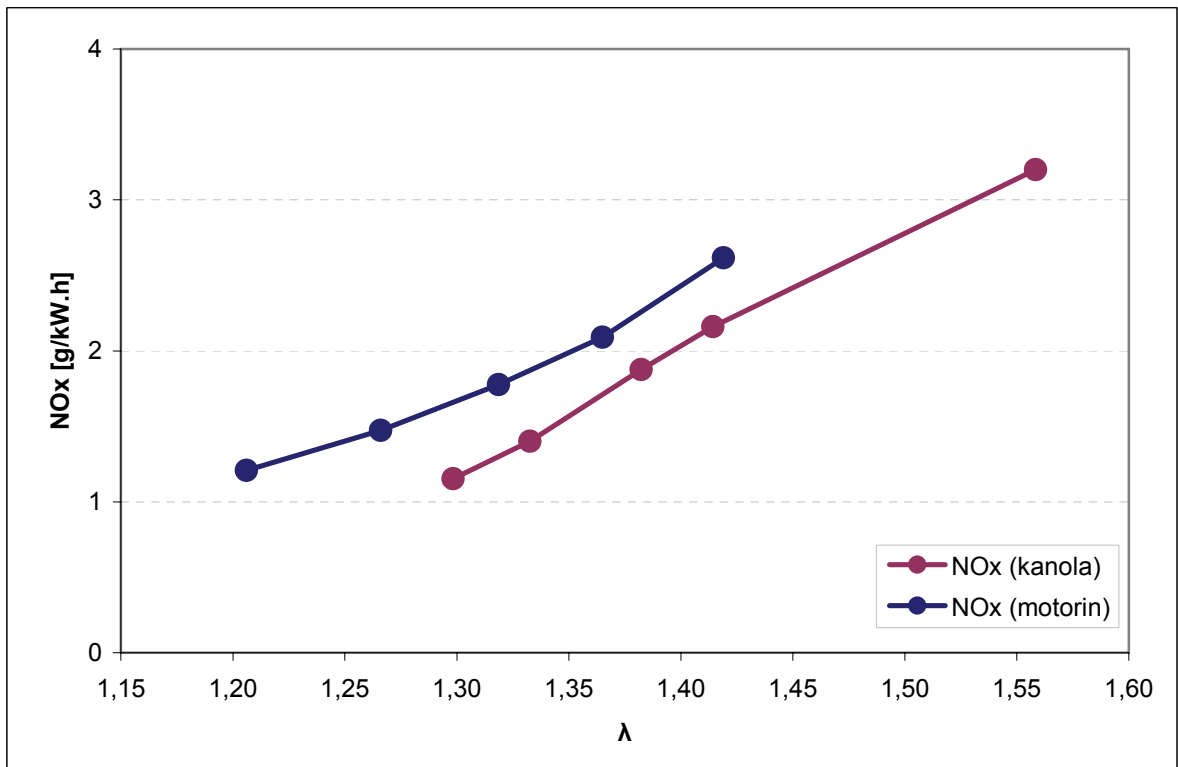
Şekil 7.18 HFK'ya bağlı NOx emisyonlarının değişimi (1500 d/d)



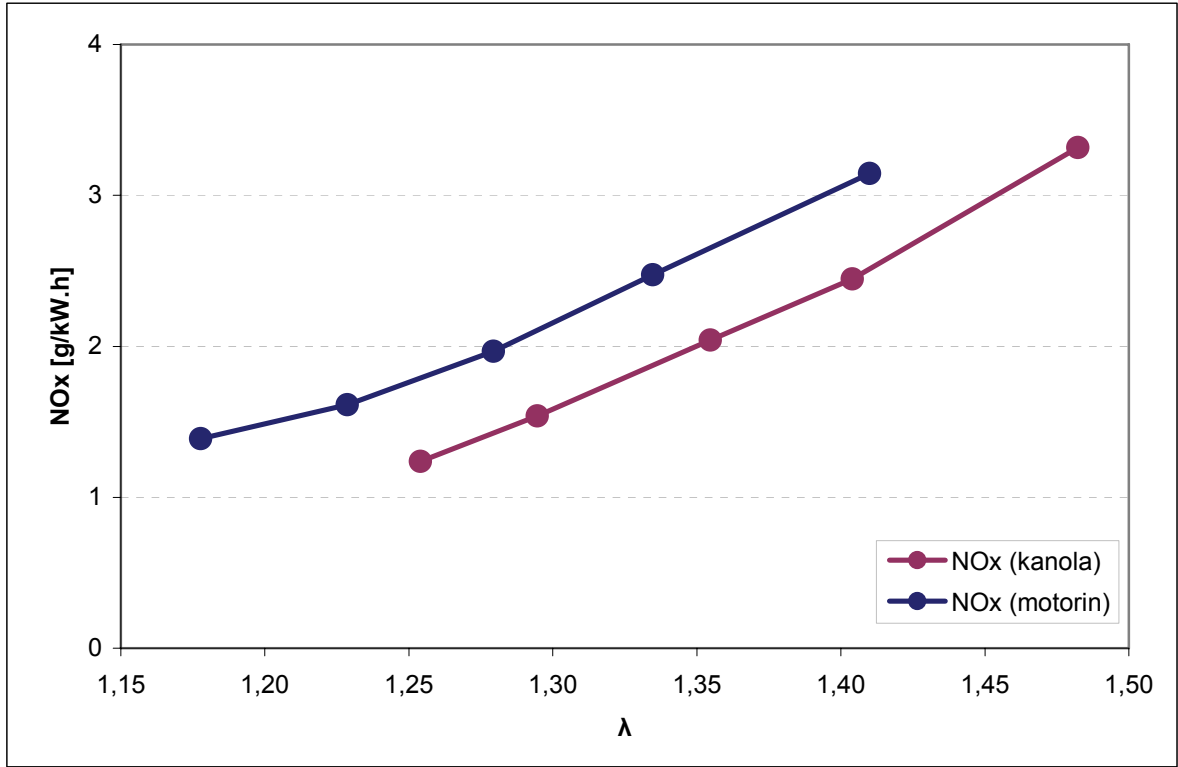
Şekil 7.19 HFK'ya bağlı NOx emisyonlarının değişimi (2000 d/d)



Şekil 7.20 HFK'ya bağlı NOx emisyonlarının değişimi (2500 d/d)



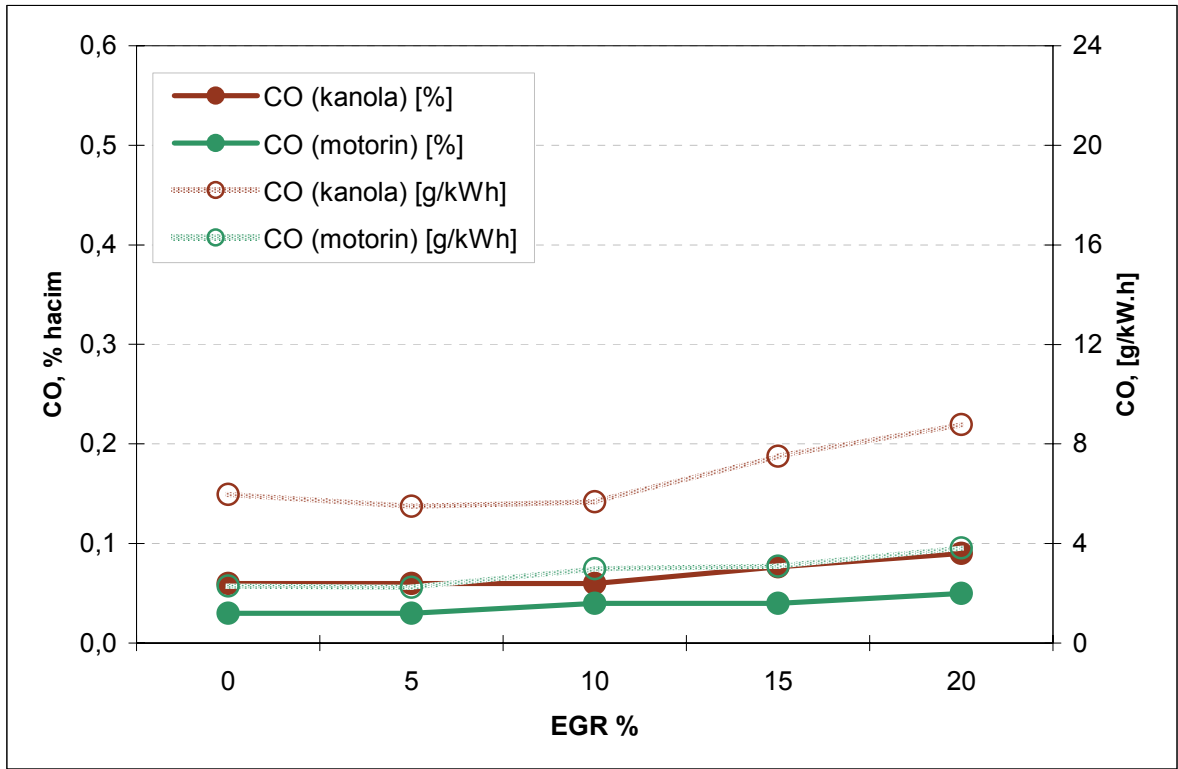
Şekil 7.21 HFK'ya bağlı NOx emisyonlarının değişimi (3000 d/d)



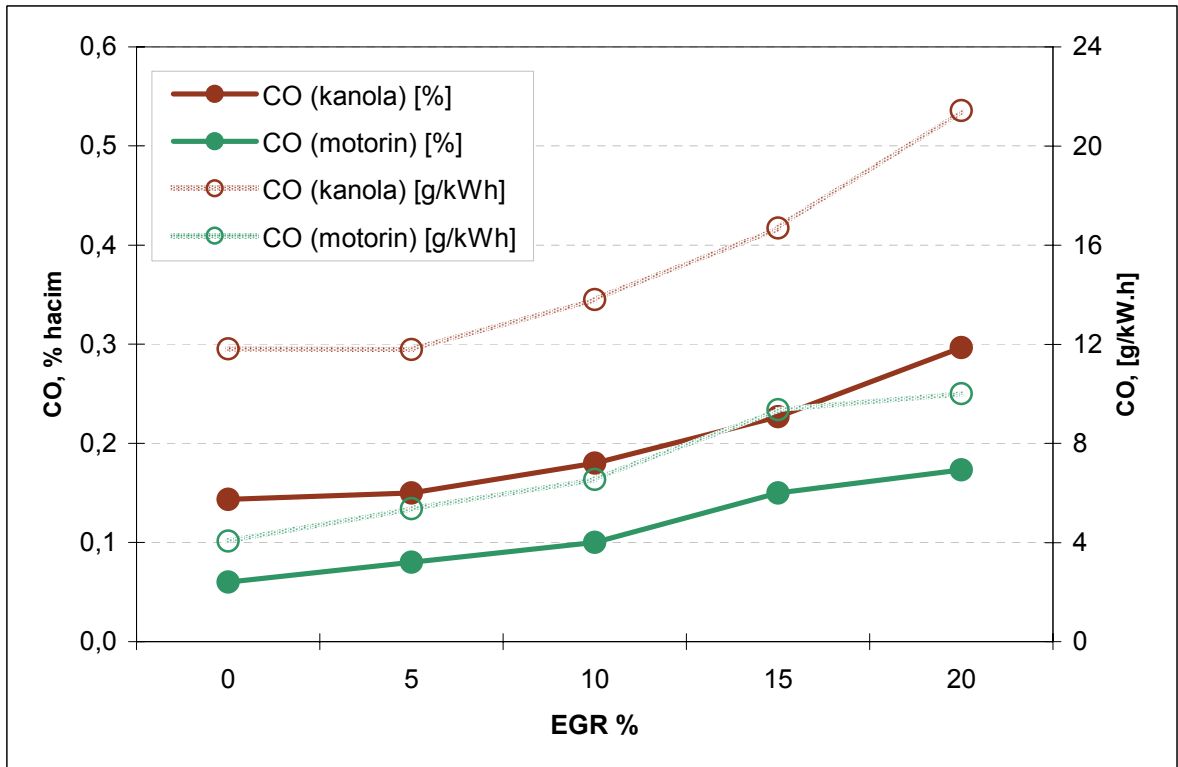
Şekil 7.22 HFK'ya bağlı NO<sub>x</sub> emisyonlarının değişimi (3500 d/d)

Hava fazlalık katsayısına göre özgül NO<sub>x</sub> emisyonları incelendiğinde düşük devirler için biyodizelin, yüksek devirler için motorinin salımın yüksek olduğu görülmektedir. Devirler arttıkça motorinin NO<sub>x</sub> salımı da artmakta en yüksek farka en yüksek hız kademesi olan 3500 d/d'da ulaşılmaktadır. Bütün hızlarda karışım fakirleştikçe NO<sub>x</sub> salımı artmaktadır.

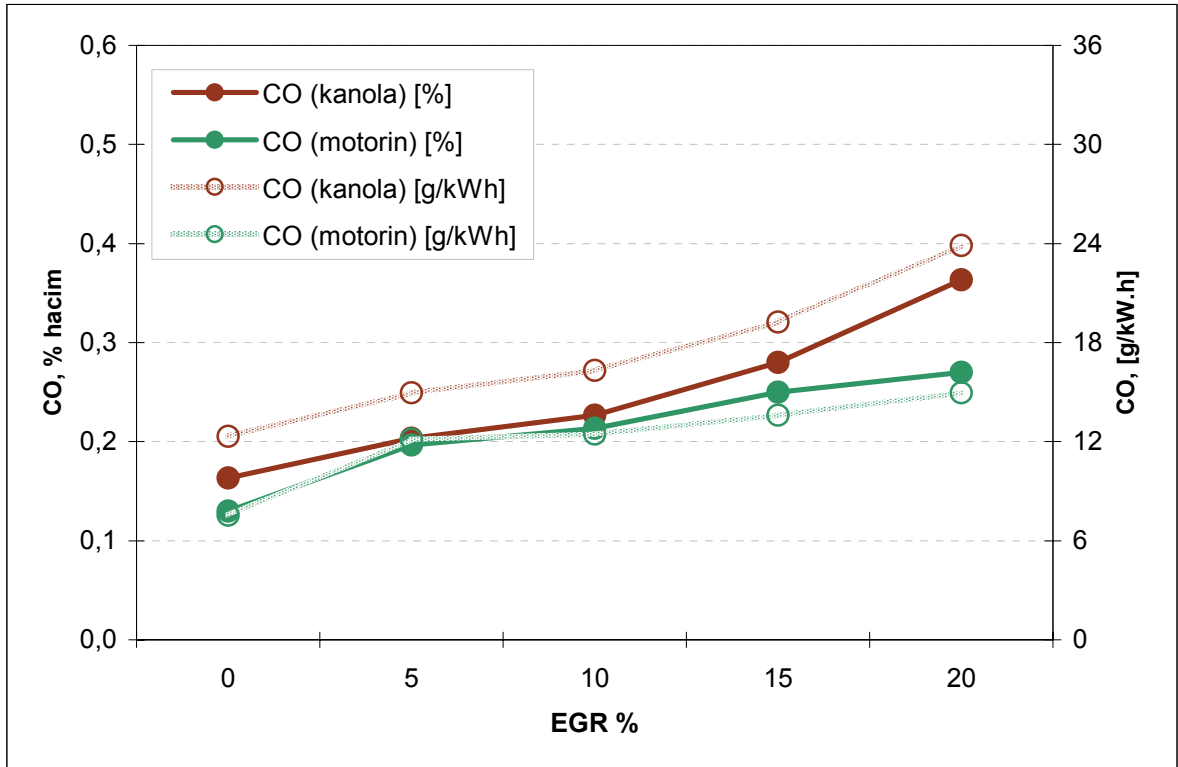
### 7.3 CO Emisyon Grafikleri



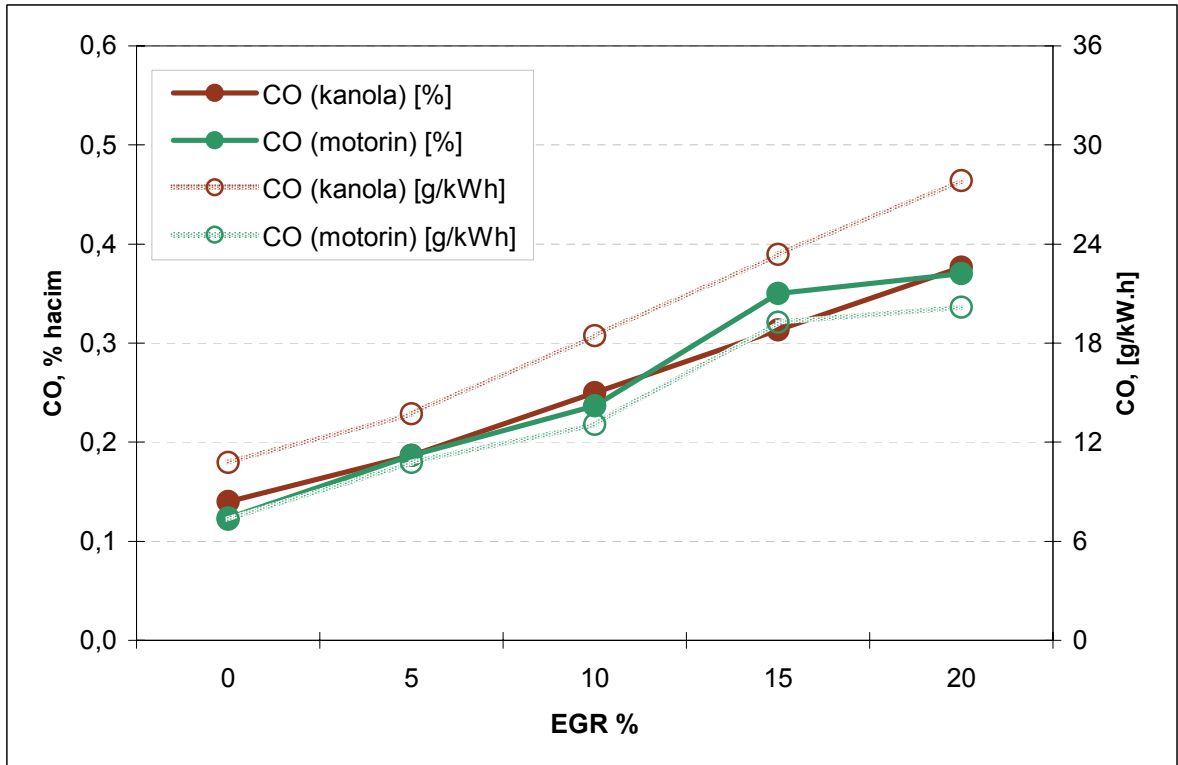
Şekil 7.23 CO emisyonlarının EGR oranına göre değişimi (1000 d/d)



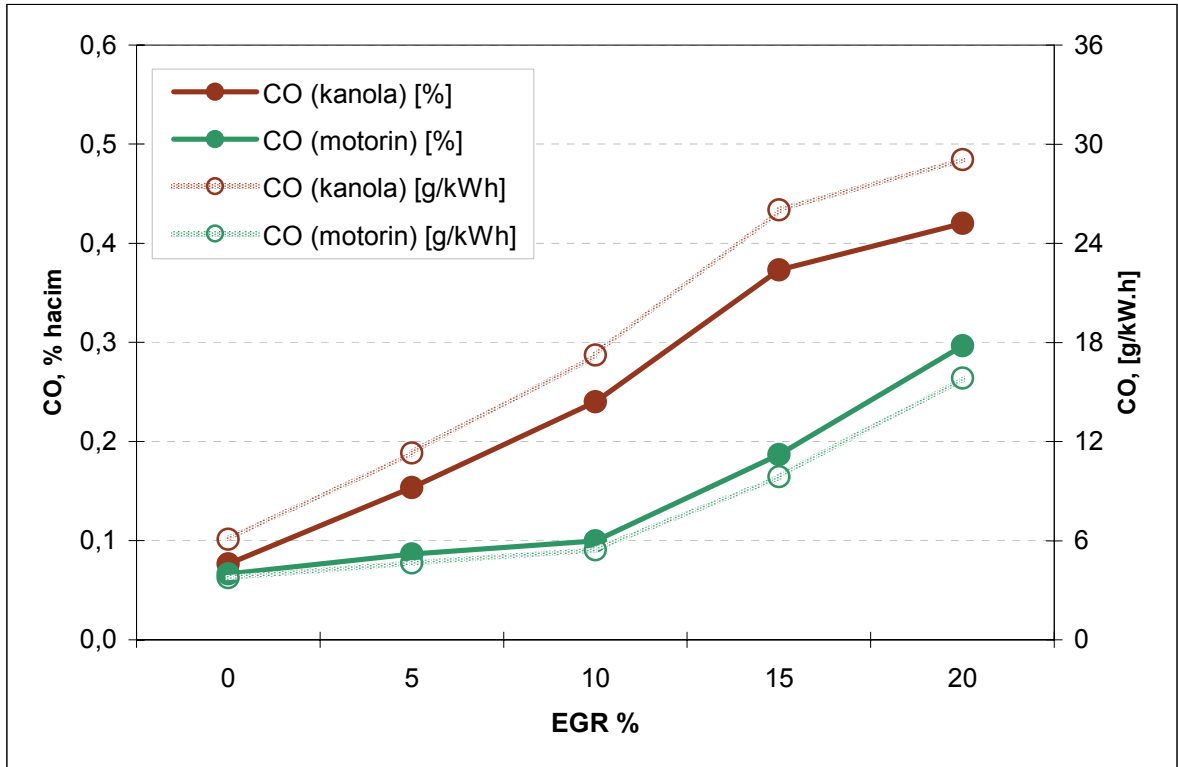
Şekil 7.24 CO emisyonlarının EGR oranına göre değişimi (1500 d/d)



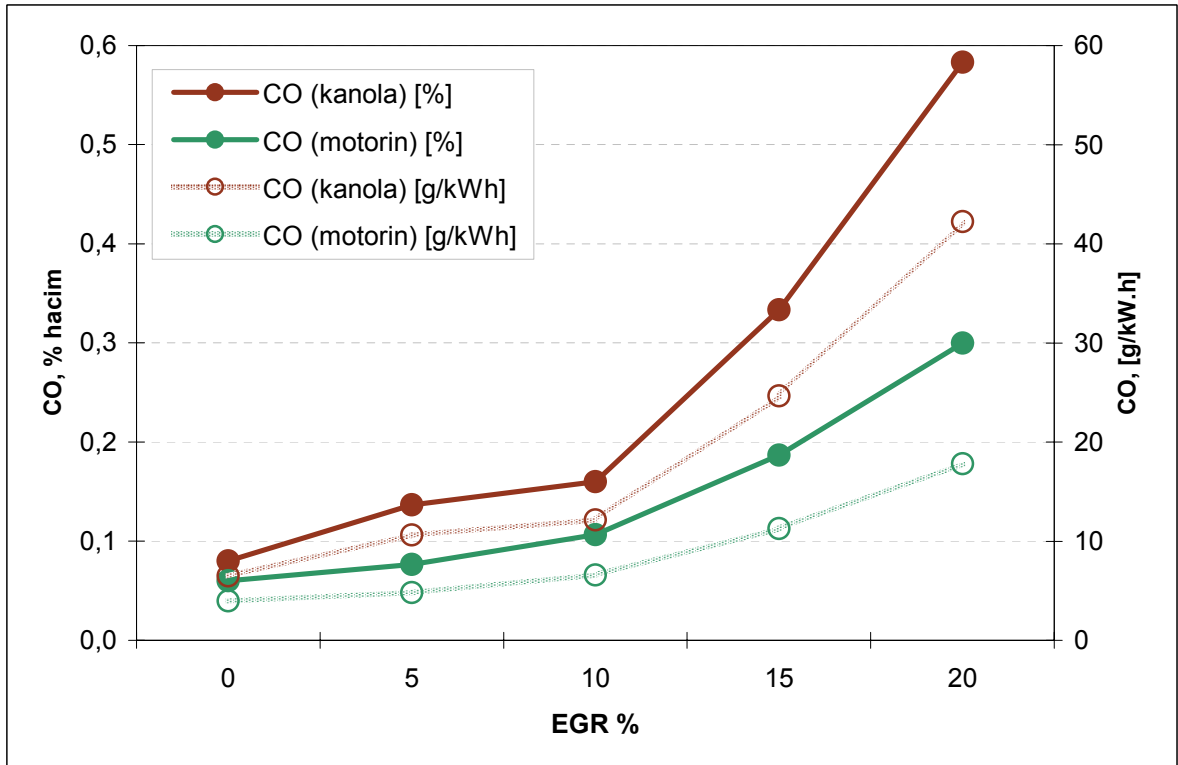
Şekil 7.25 CO emisyonlarının EGR oranına göre değişimi (2000 d/d)



Şekil 7.26 CO emisyonlarının EGR oranına göre değişimi (2500 d/d)

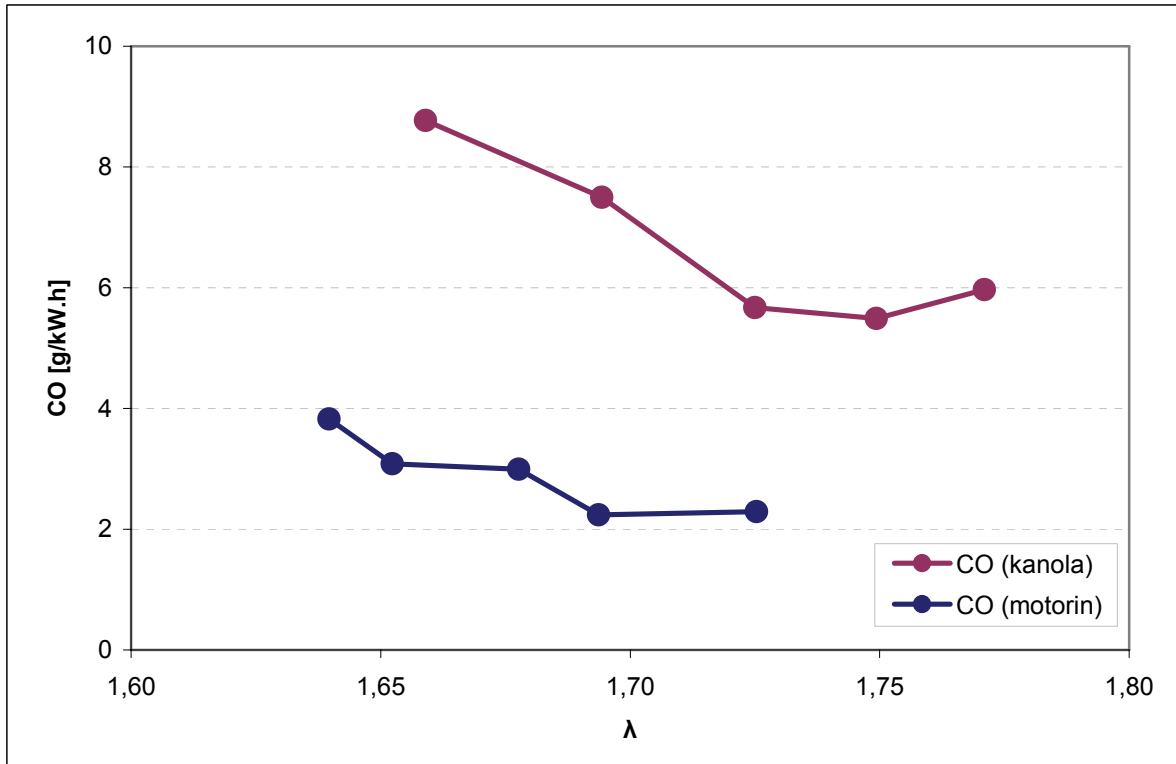


Şekil 7.27 CO emisyonlarının EGR oranına göre değişimi (3000 d/d)

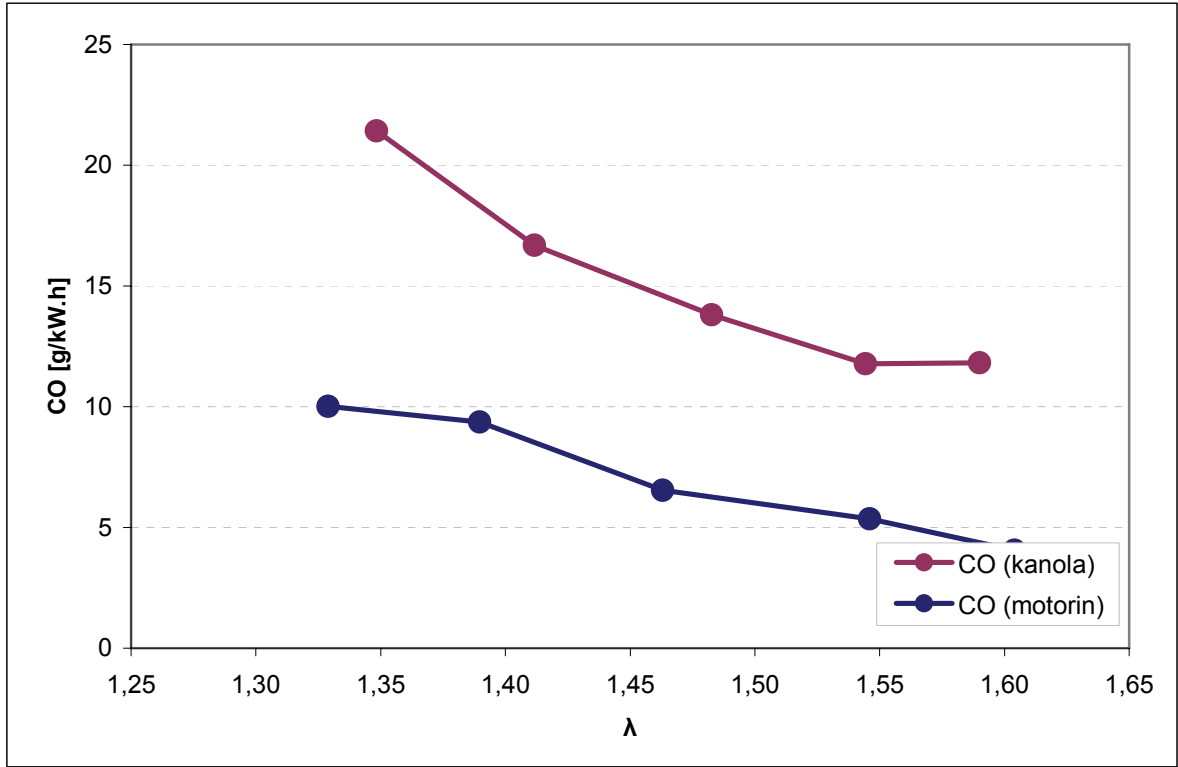


Şekil 7.28 CO emisyonlarının EGR oranına göre değişimi (3500 d/d)

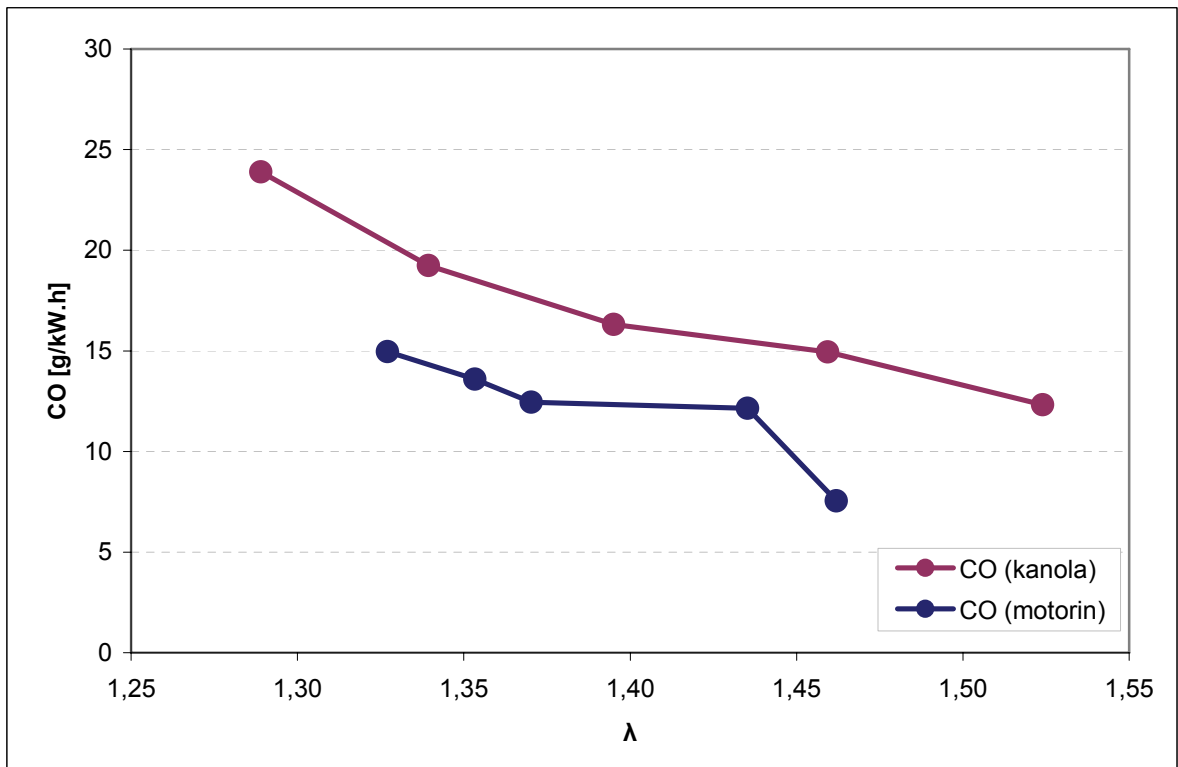
Gerek hacimsel bazda, gerekse özgül gaz emisyonları açısından CO emisyonları kanola yakıtı kullanıldığında daha fazla meydana gelmektedir. EGR oranının artışı her iki yakıt için CO emisyonlarında artışa sebep olmuştur. EGR oranına bağlı değişim açısından her iki yakıtın birbirine yakın eğilimleri olduğu görülmekte ise de %20 EGR oranında kanola yakıtında ciddi artışlar olduğu bilhassa yüksek devirlerde görülmektedir. %10 EGR oranına kadar CO emisyonlarında ciddi bir artışın oluşmadığı söylenebilir.



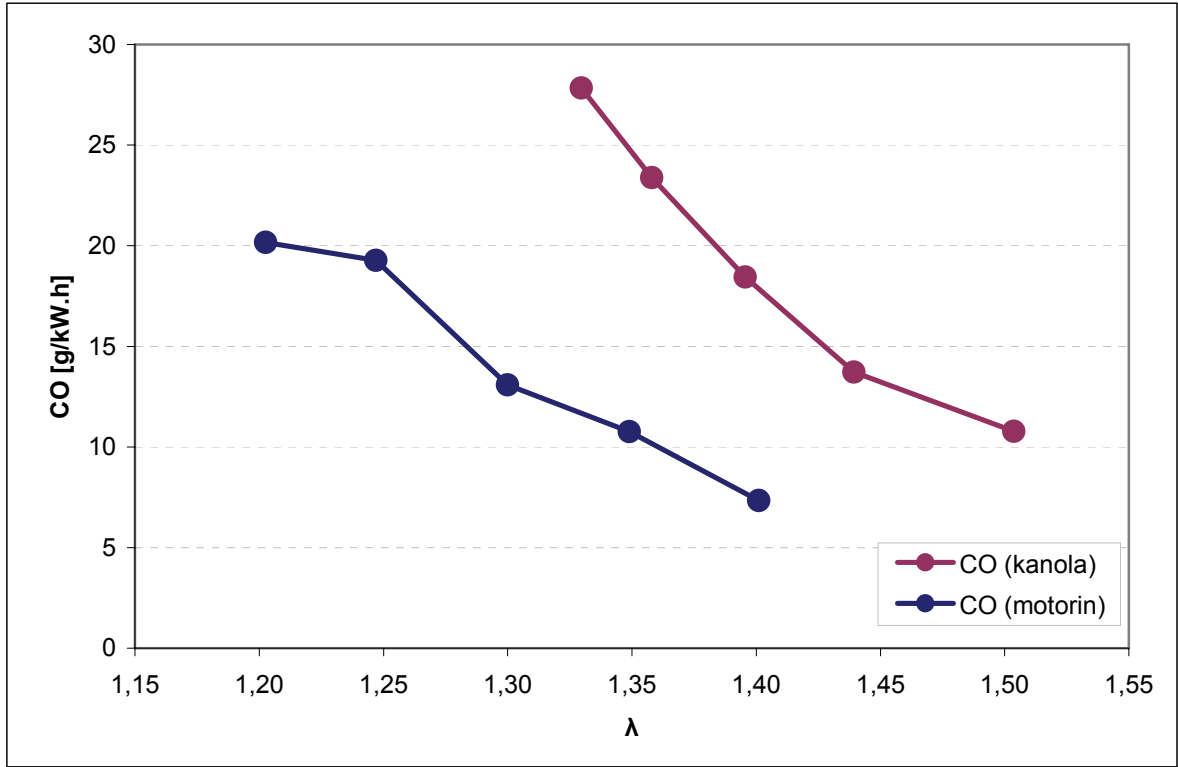
Şekil 7.29 HFK'ya bağlı CO emisyonlarının değişimi (1000 d/d)



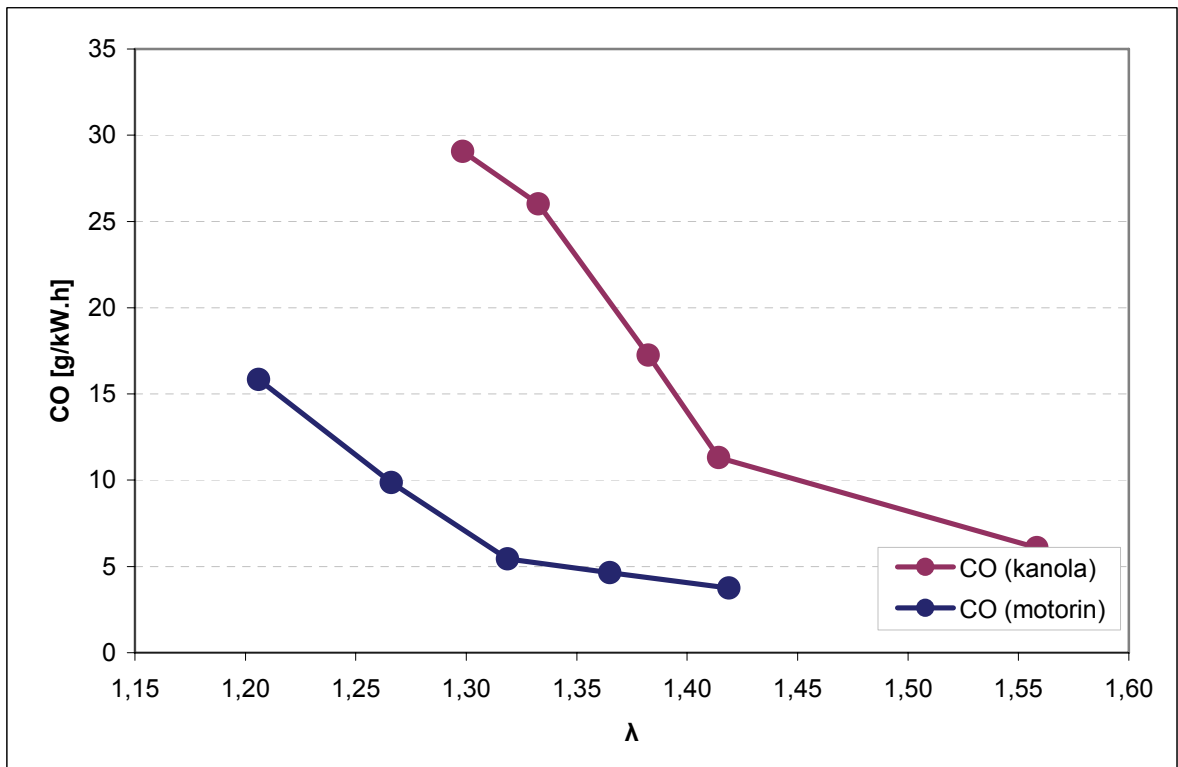
Şekil 7.30 HFK'ya bağlı CO emisyonlarının değişimi (1500 d/d)



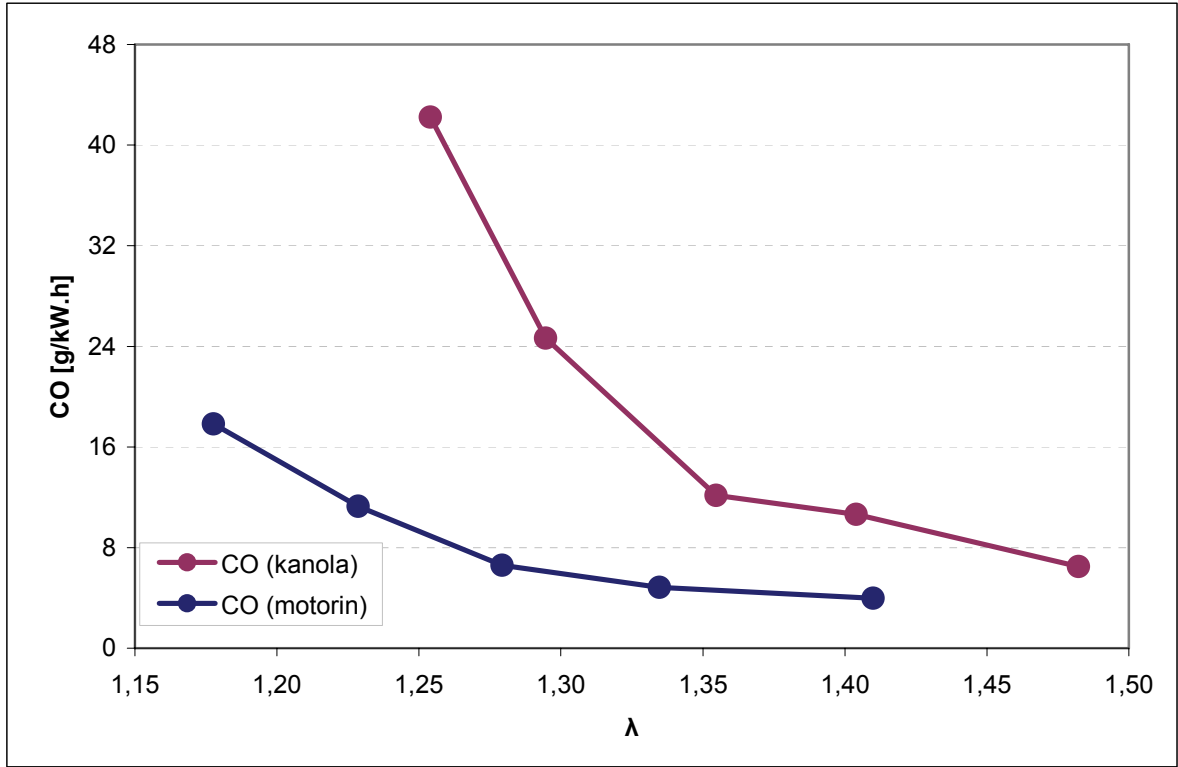
Şekil 7.31 HFK'ya bağlı CO emisyonlarının değişimi (2000 d/d)



Şekil 7.32 HFK'ya bağlı CO emisyonlarının değişimi (2500 d/d)



Şekil 7.33 HFK'ya bağlı CO emisyonlarının değişimi (3000 d/d)

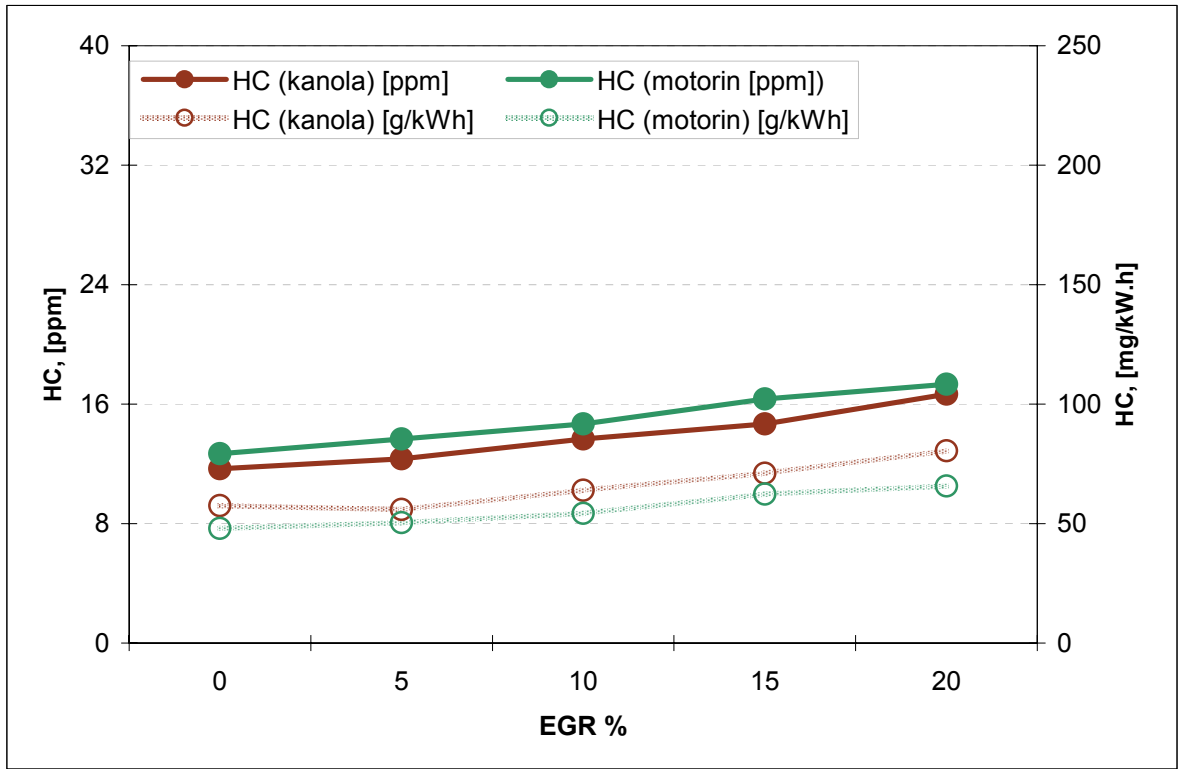


Şekil 7.34 HFK'ya bağlı CO emisyonlarının değişimi (3500 d/d)

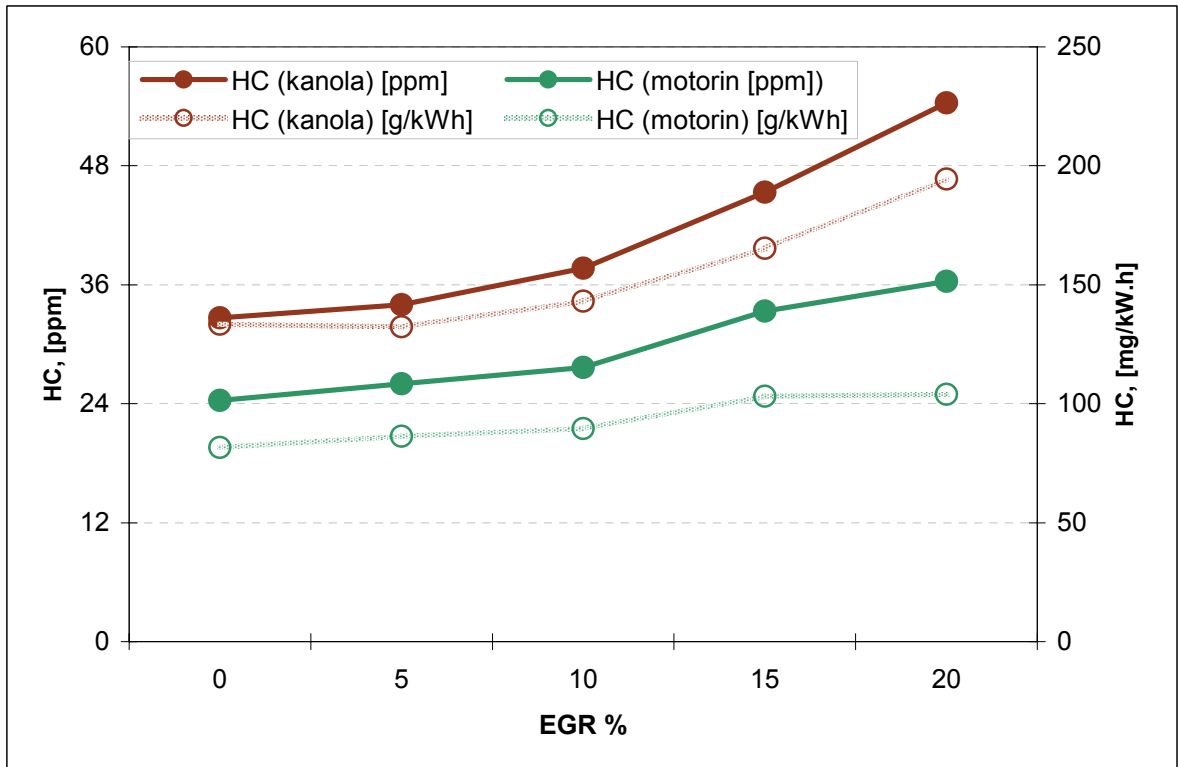
Bütün devirler göz önüne alındığında kanola biyodizelinin CO emisyonlarının aynı lamda şartında motorinden yüksek olduğu kaydedilmiştir. Bunun yanında her iki yakıt için artan lamda değerleriyle birlikte emisyonlarında azalma kaydedilmiştir. Temel olarak yetersiz oksijen gazı sebebiyle meydana gelen eksik yanma ürünü olan karbonmonoksit emisyonlarının oksijenin artmasıyla azalacağı açıktır. Burada kanolanın motorinden daha yüksek emisyon değerlerine sahip olması yüksek viskozitesinin kötüleştirdiği atomizasyon kabiliyetiyle açıklanabilir.

Biyodizelin CO emisyonları açısından motorine nazaran çok daha hassas olduğu ortaya çıkan bir diğer neticedir. Orta ve yüksek devirlerde 1.45, en yüksek devirde ise 1.35 lamda değerlerinden itibaren emisyonların belirgin bir biçimde artmaya başladığı görülmektedir.

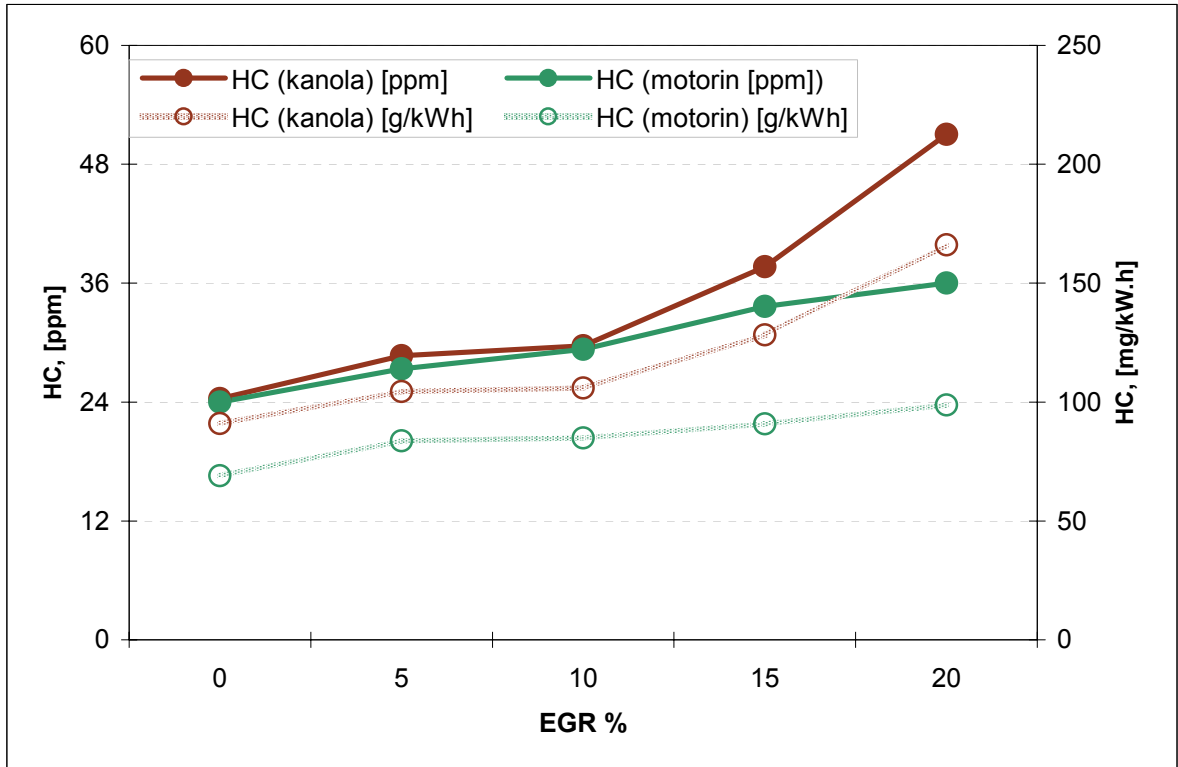
#### 7.4 HC Emisyon Grafikleri



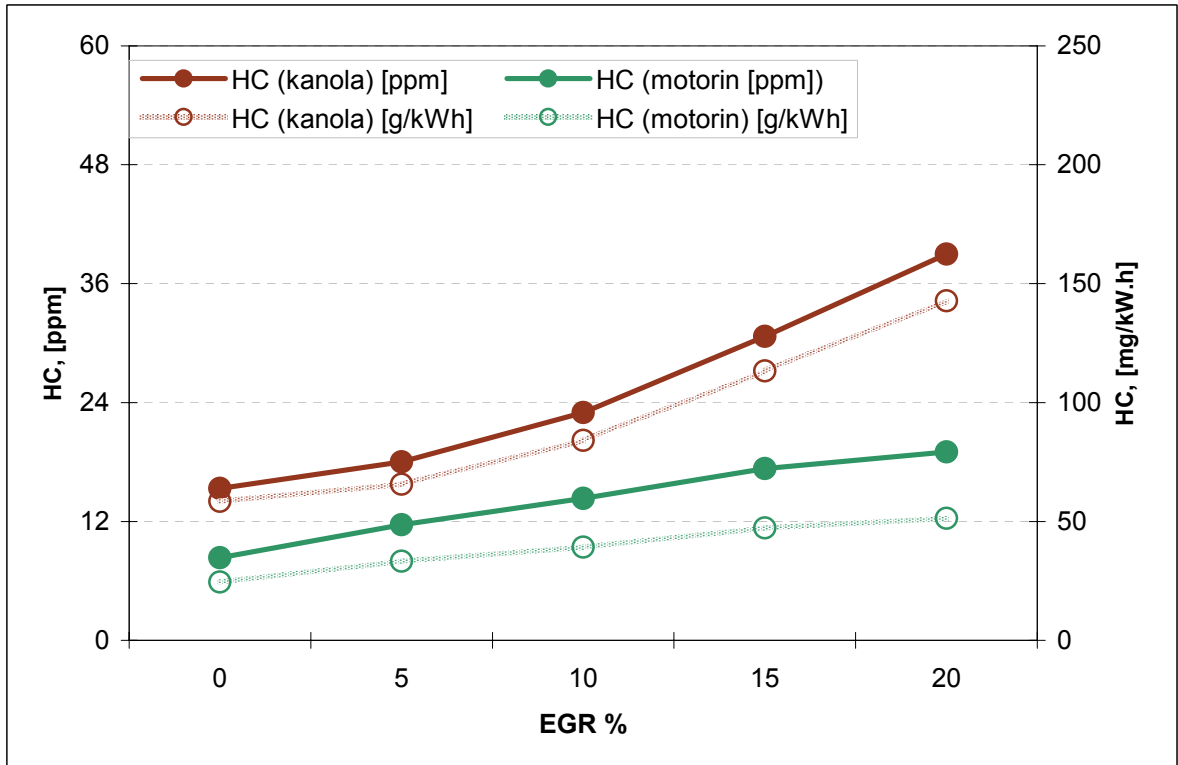
Şekil 7.35 HC emisyonlarının EGR oranına göre değişimi (1000 d/d)



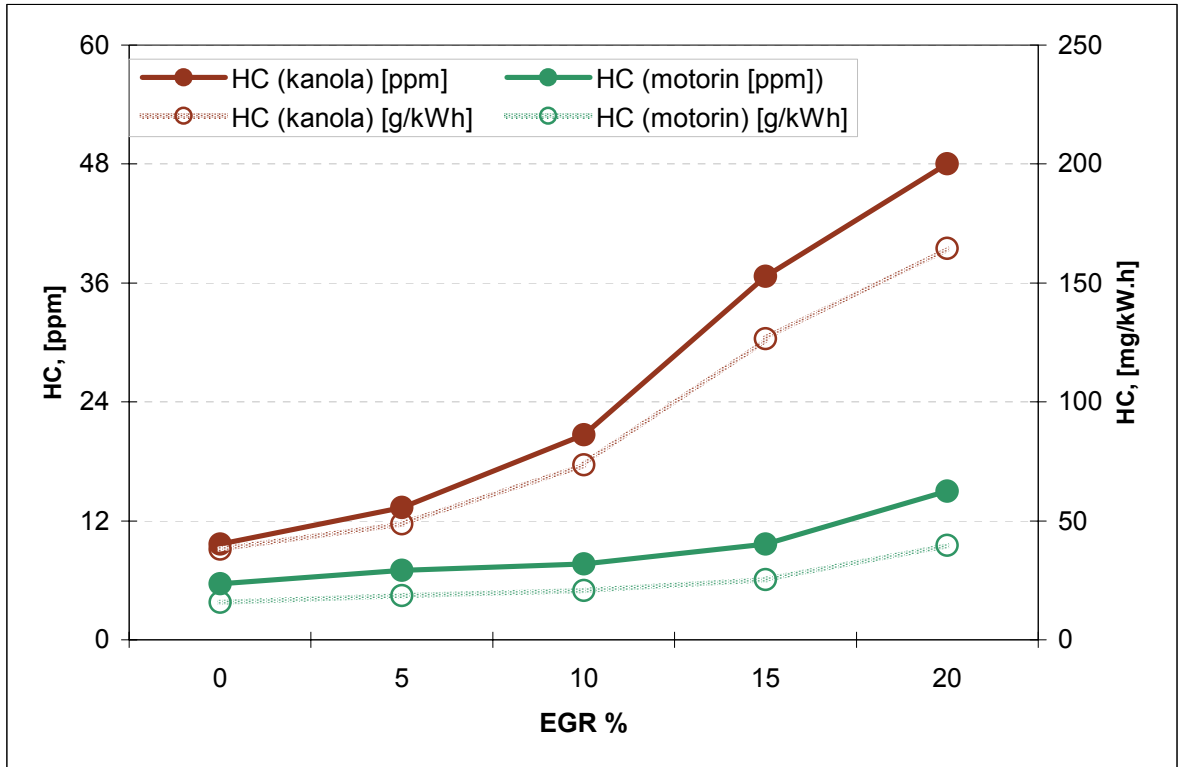
Şekil 7.36 HC emisyonlarının EGR oranına göre değişimi (1500 d/d)



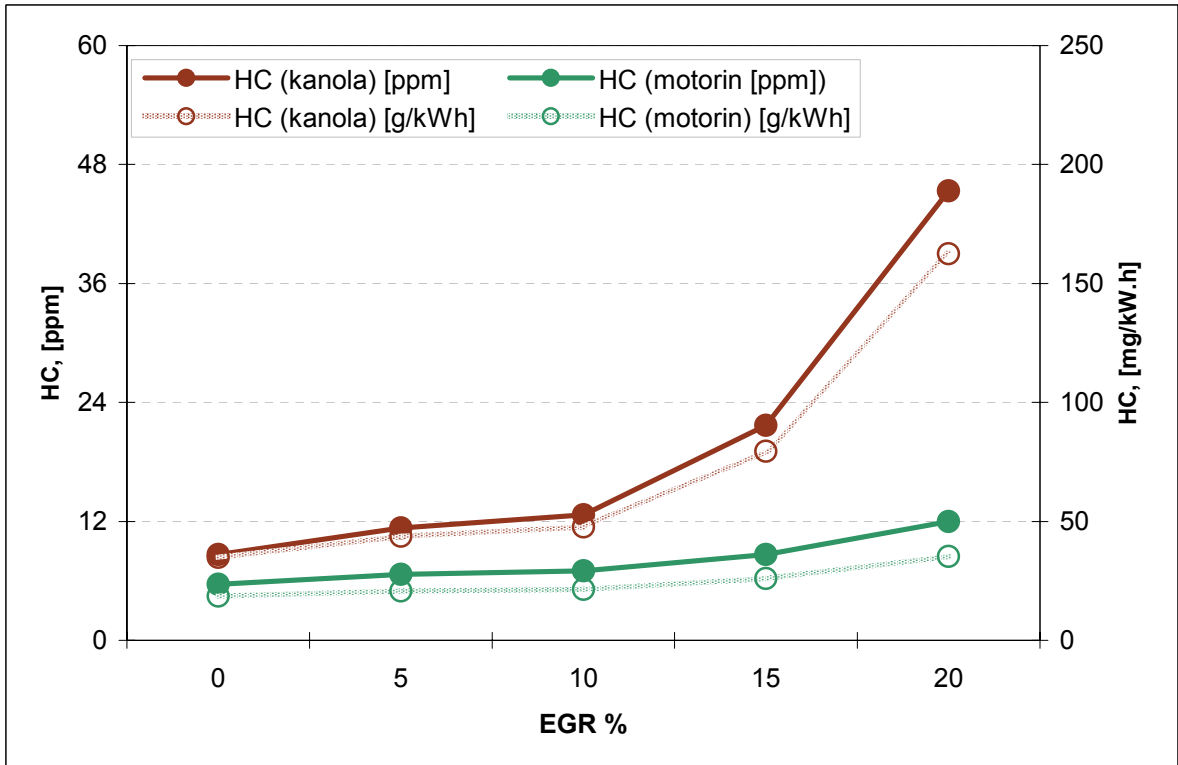
Şekil 7.37 HC emisyonlarının EGR oranına göre değişimi (2000 d/d)



Şekil 7.38 HC emisyonlarının EGR oranına göre değişimi (2500 d/d)

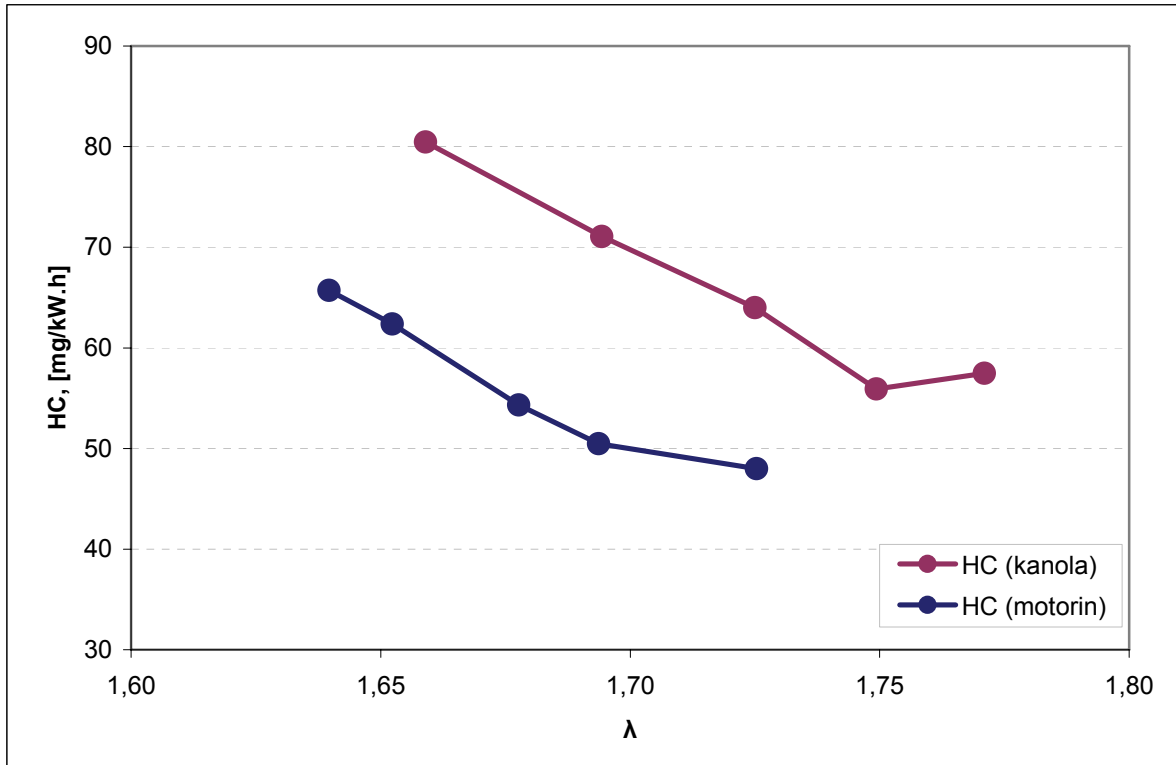


Şekil 7.39 HC emisyonlarının EGR oranına göre değişimi (3000 d/d)

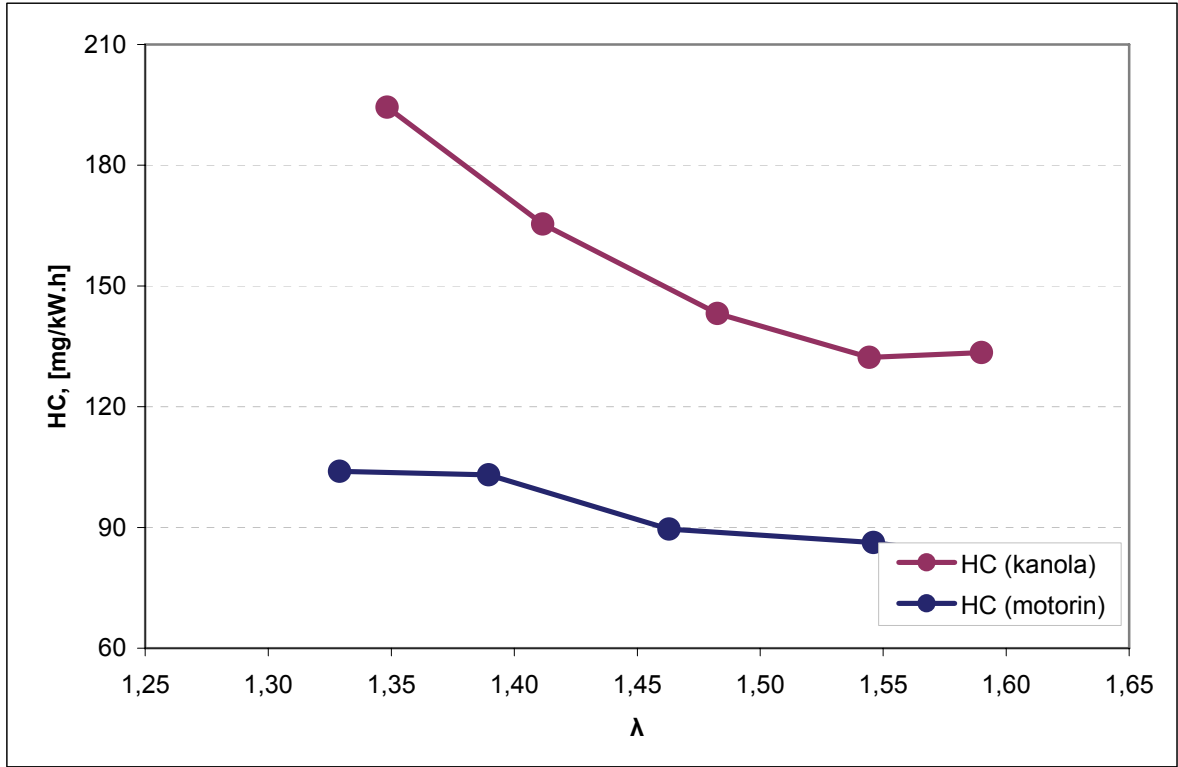


Şekil 7.40 HC emisyonlarının EGR oranına göre değişimi (3500 d/d)

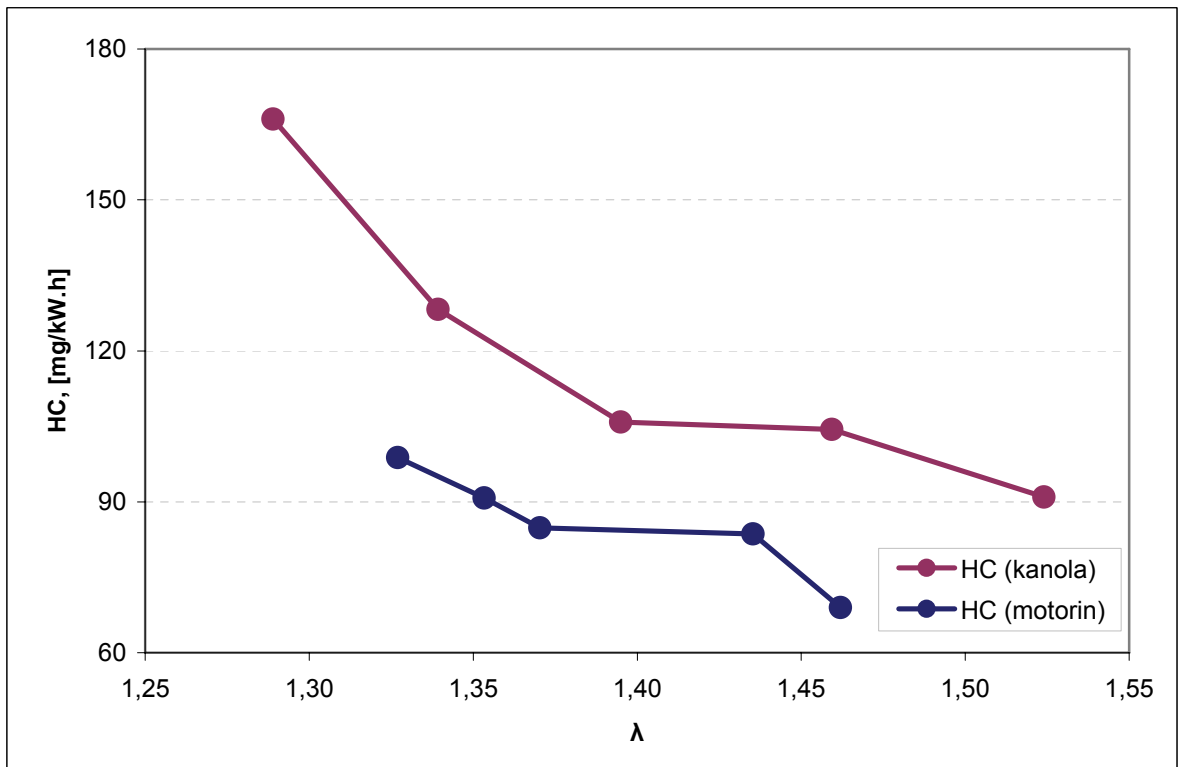
En düşük test devri hariç tutulduğunda hacimsel ve özgül gaz emisyonları açısından HC emisyonları kanola yakıtı kullanıldığında daha fazla meydana gelmektedir. EGR oranının artışı her iki yakıt için HC emisyonlarında yükselmeler meydana getirmiştir. EGR oranına bağlı değişim açısından kanola yakıtının EGR oranının artışına daha duyarlı olduğu gözlenmiştir. Bu duyarlılık artan devir ile yükselme kaydetmiştir. Bilhassa %20 EGR oranında kanola yakıtının HC emisyonları motorine nazaran daha fazla yükselme kaydetmiştir.



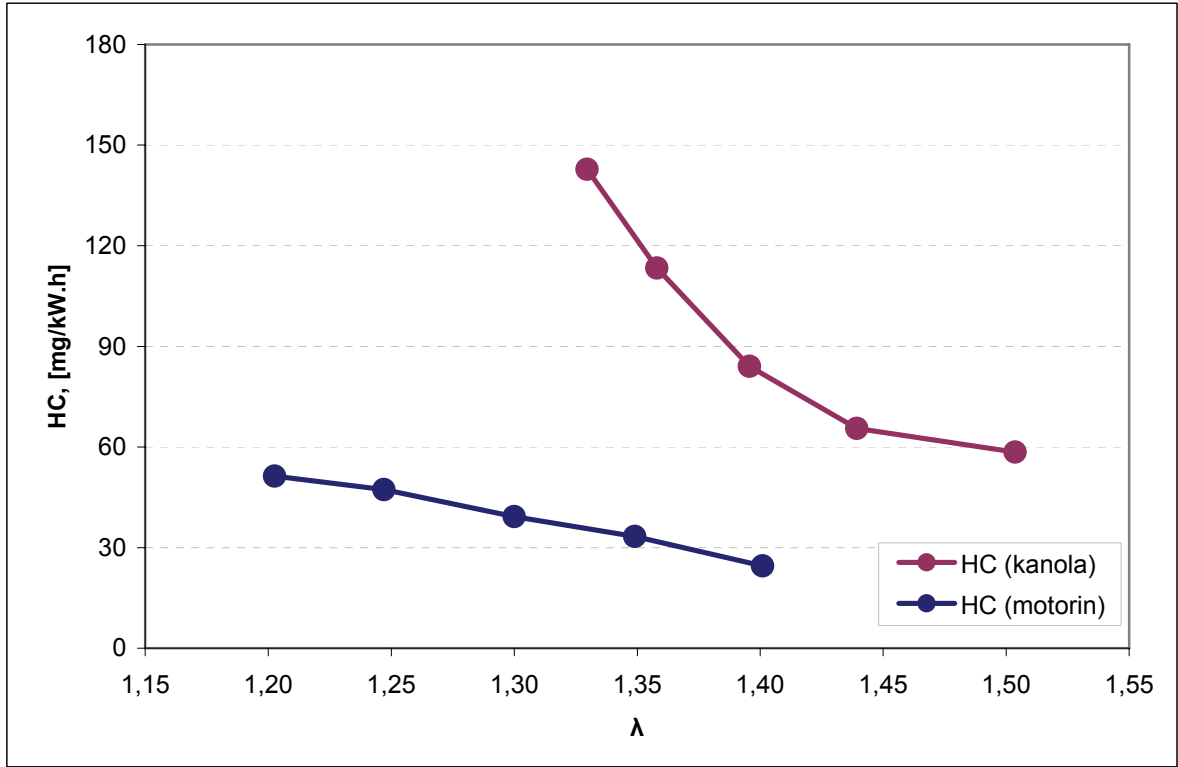
Şekil 7.41 HFK'ya bağlı HC emisyonlarının değişimi (1000 d/d)



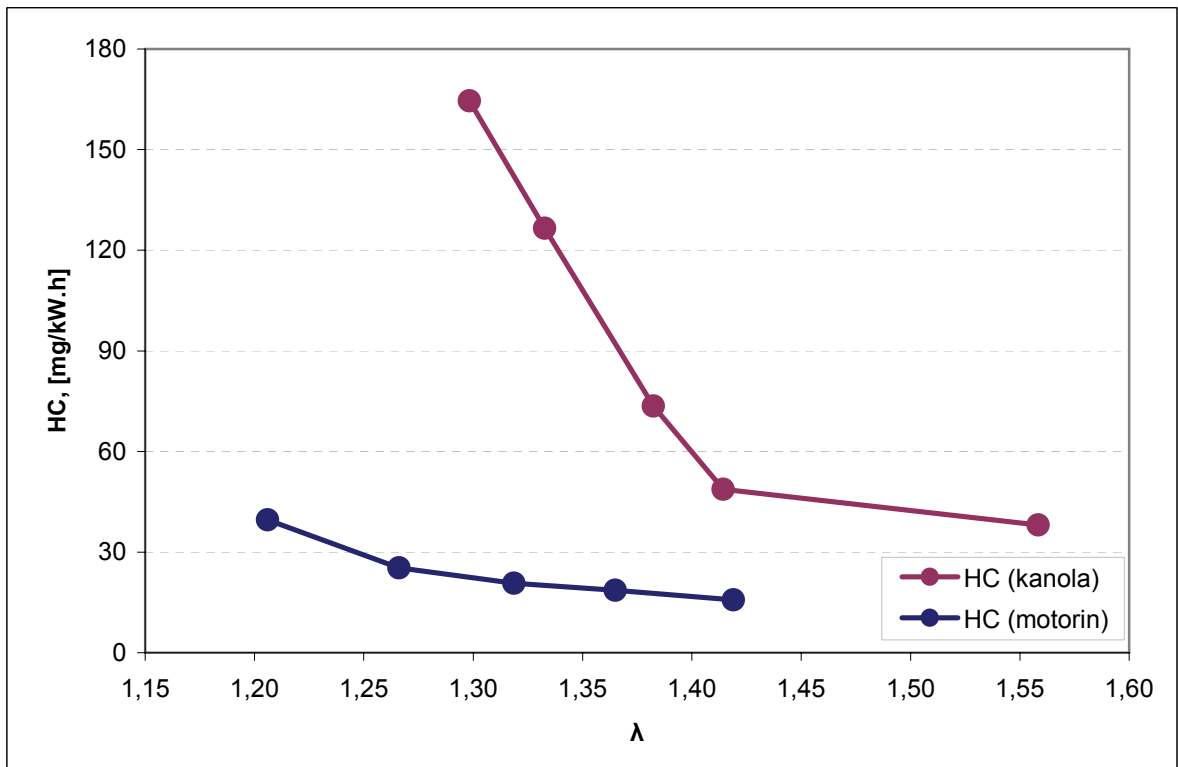
Şekil 7.42 HFK'ya bağlı HC emisyonlarının değişimi (1500 d/d)



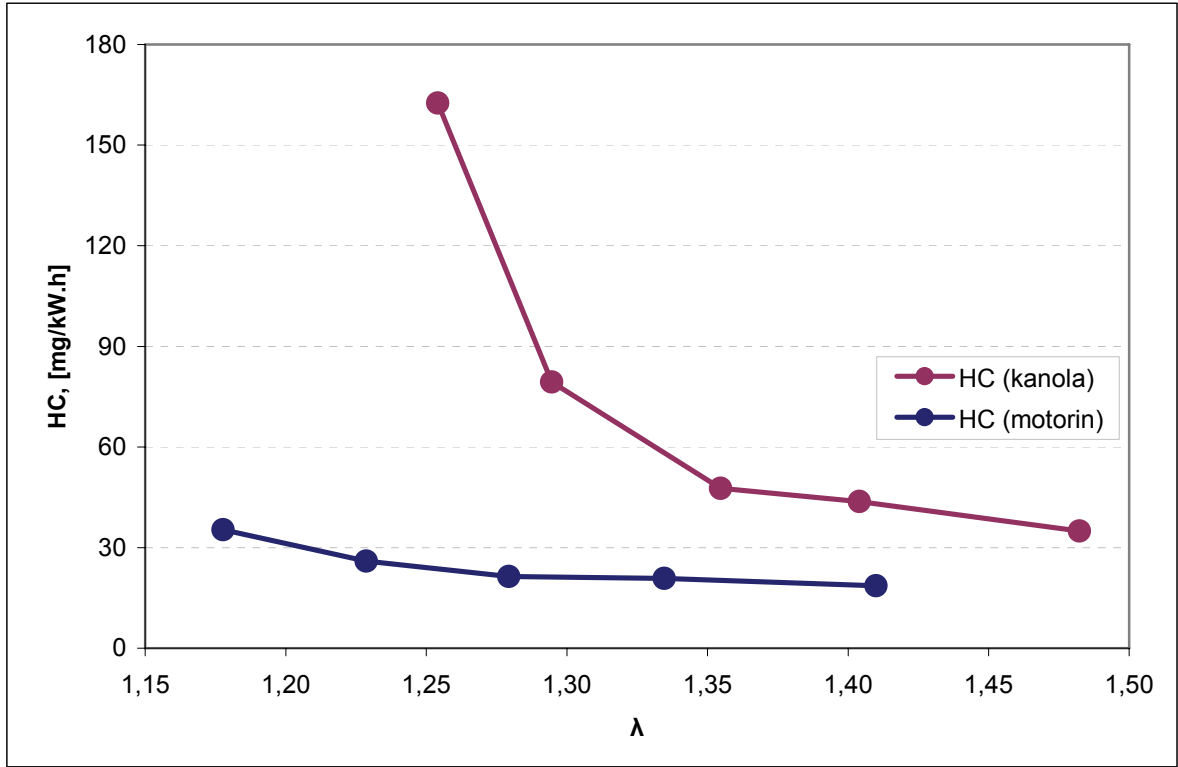
Şekil 7.43 HFK'ya bağlı HC emisyonlarının değişimi (2000 d/d)



Şekil 7.44 HFK'ya bağlı HC emisyonlarının değişimi (2500 d/d)



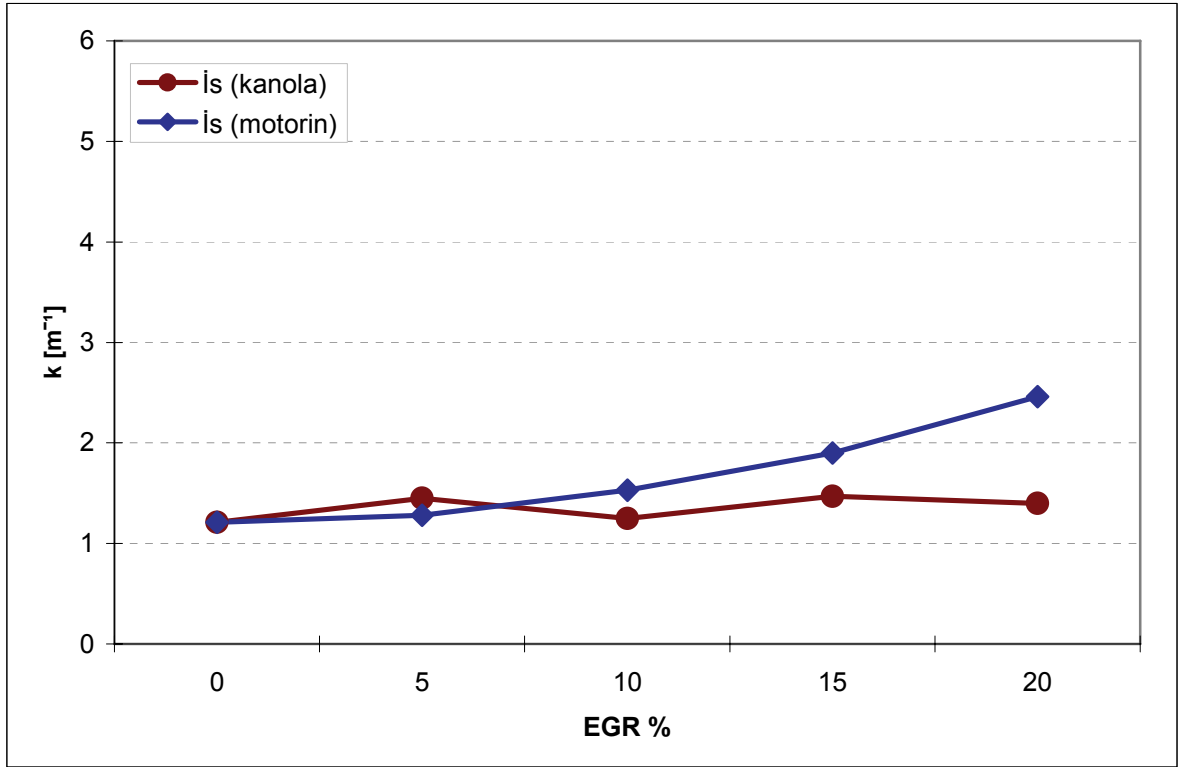
Şekil 7.45 HFK'ya bağlı HC emisyonlarının değişimi (3000 d/d)



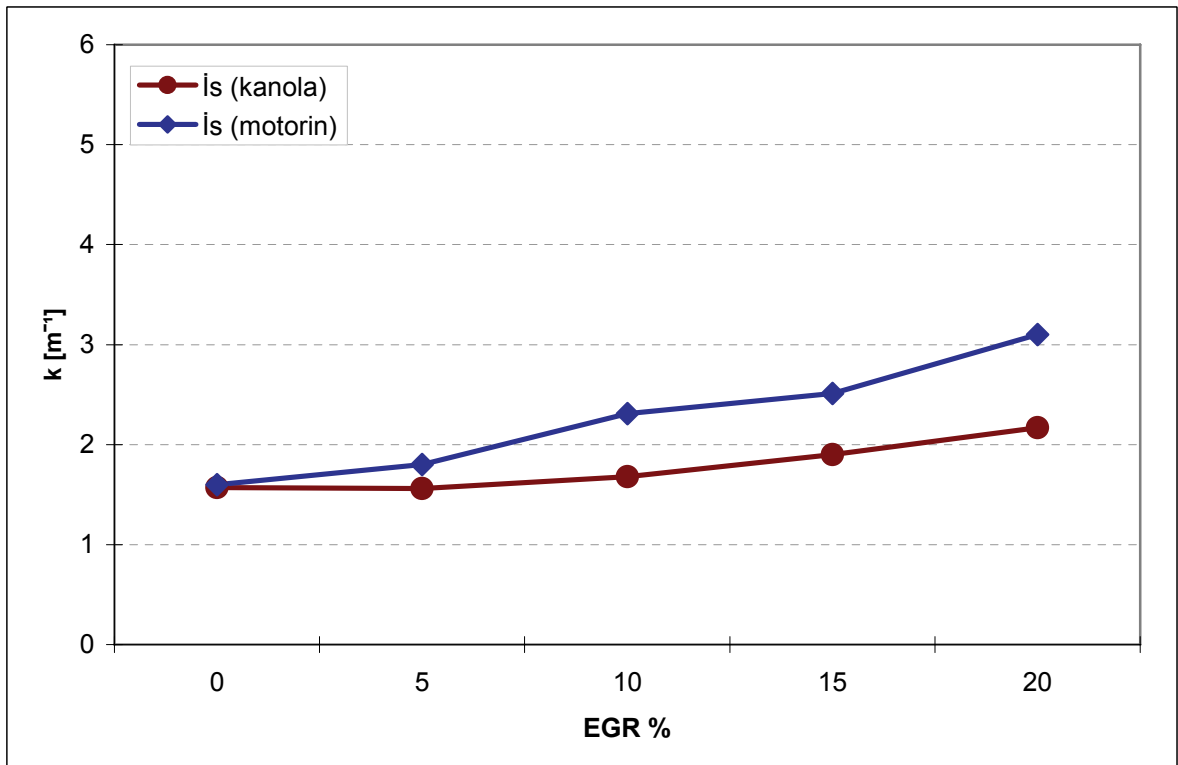
Şekil 7.46 HFK'ya bağlı HC emisyonlarının değişimi (3500 d/d)

Yanmamış hidrokarbonlar açısından biyodizel bütün hız şartlarında motorinden daha yüksek değerlere sahiptir. Verilerin meydana getirdiği eğrilerin karakterleri karbonmonoksit emisyonlarının eğrileriyle paralellik göstermektedir. Biyodizelin hava fazlalık katsayısına çok daha fazla duyarlı olduğu, özellikle lamdanın 1.4 değerinin altındaki durumlarda emisyonların çok fazla yükseldiği gözlenmiştir. Bu durum düşük hızlarda bir sorun oluşturmasa da orta hızlarda %15 EGR ve üstü, Yüksek hızlarda ise %10 EGR ve üstü için lamdanın 1.4'ün altına inmesine sebep olmaktadır.

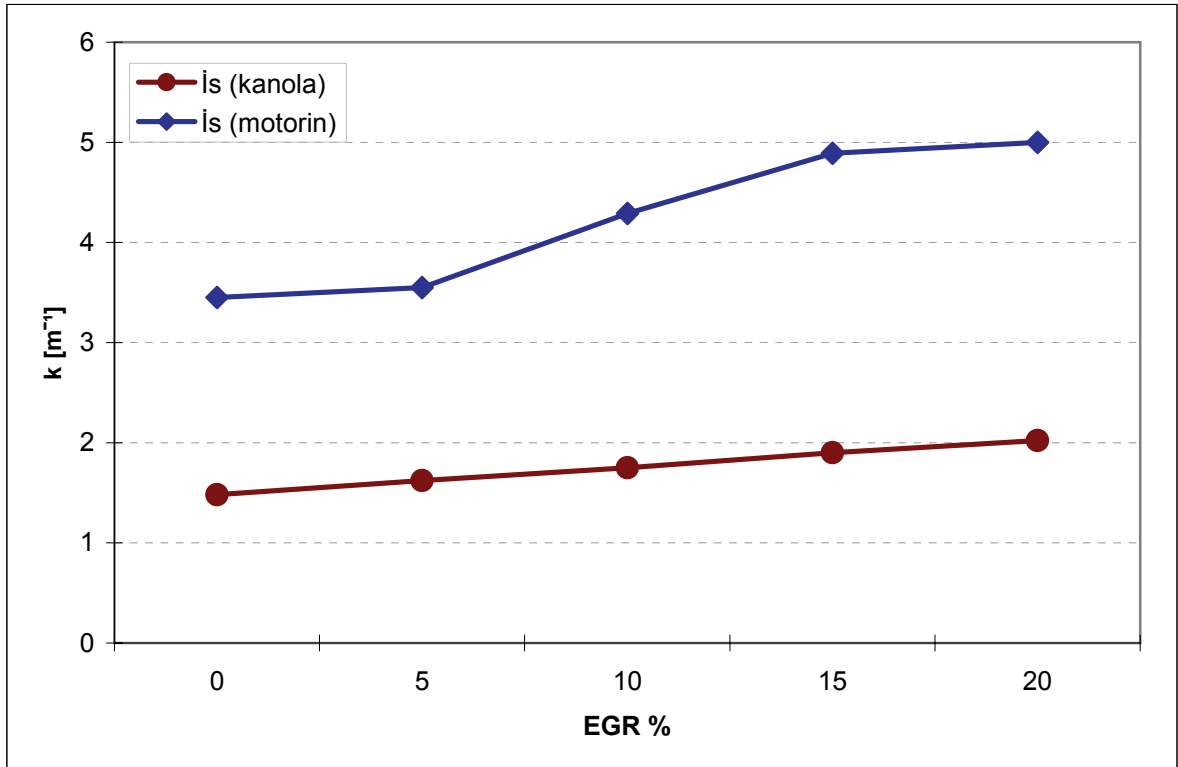
## 7.5 İş Emisyon Grafikleri



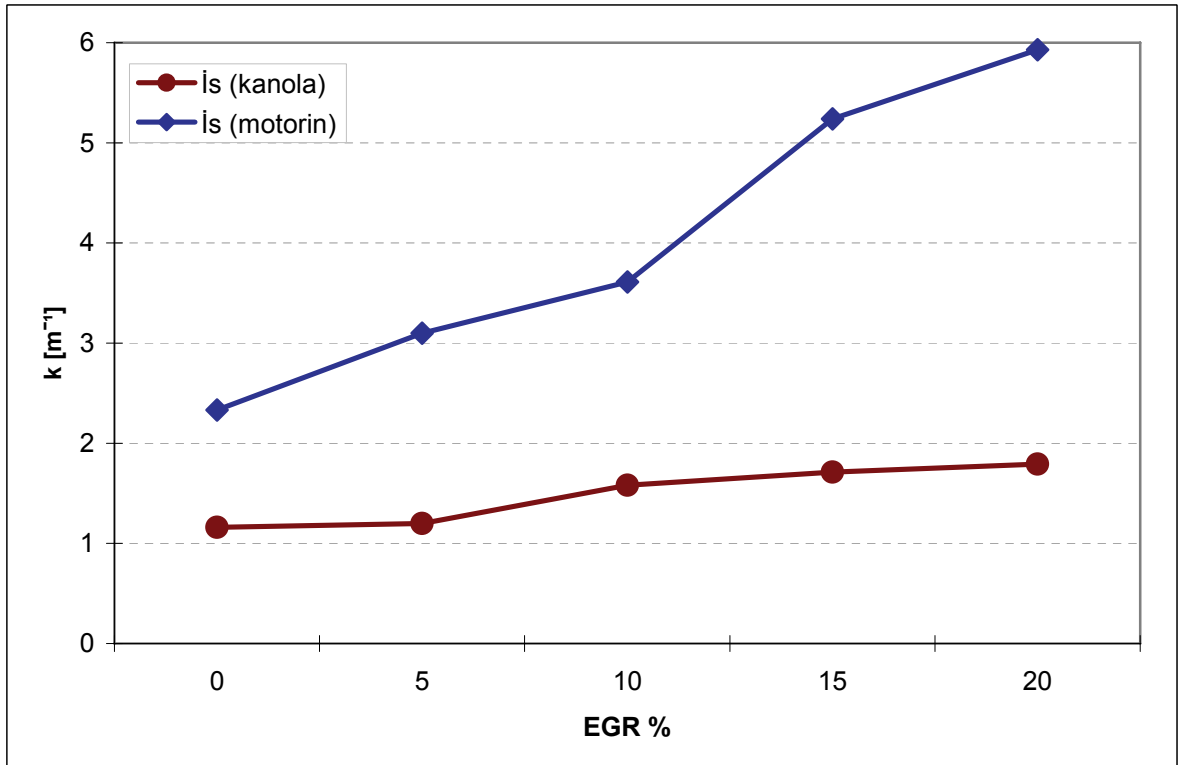
Şekil 7.47 İş emisyonlarının (k) EGR oranına göre değişimi (1000 d/d)



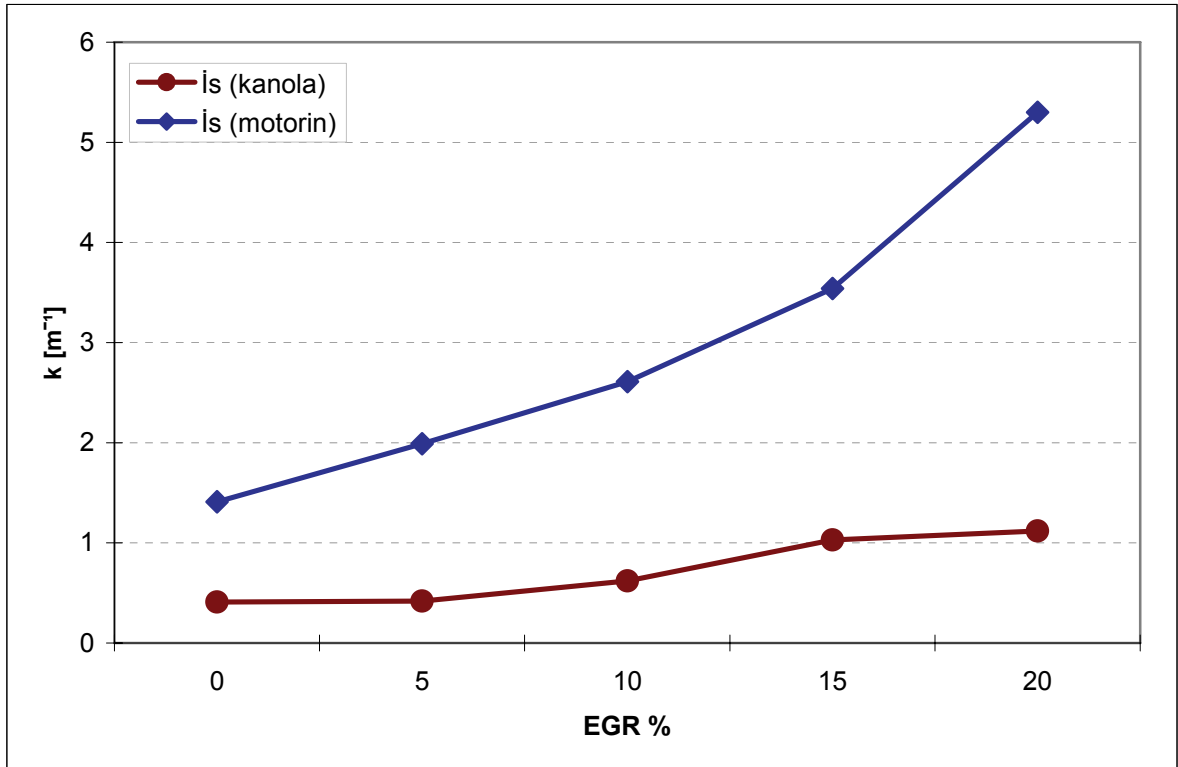
Şekil 7.48 İş emisyonlarının (k) EGR oranına göre değişimi (1500 d/d)



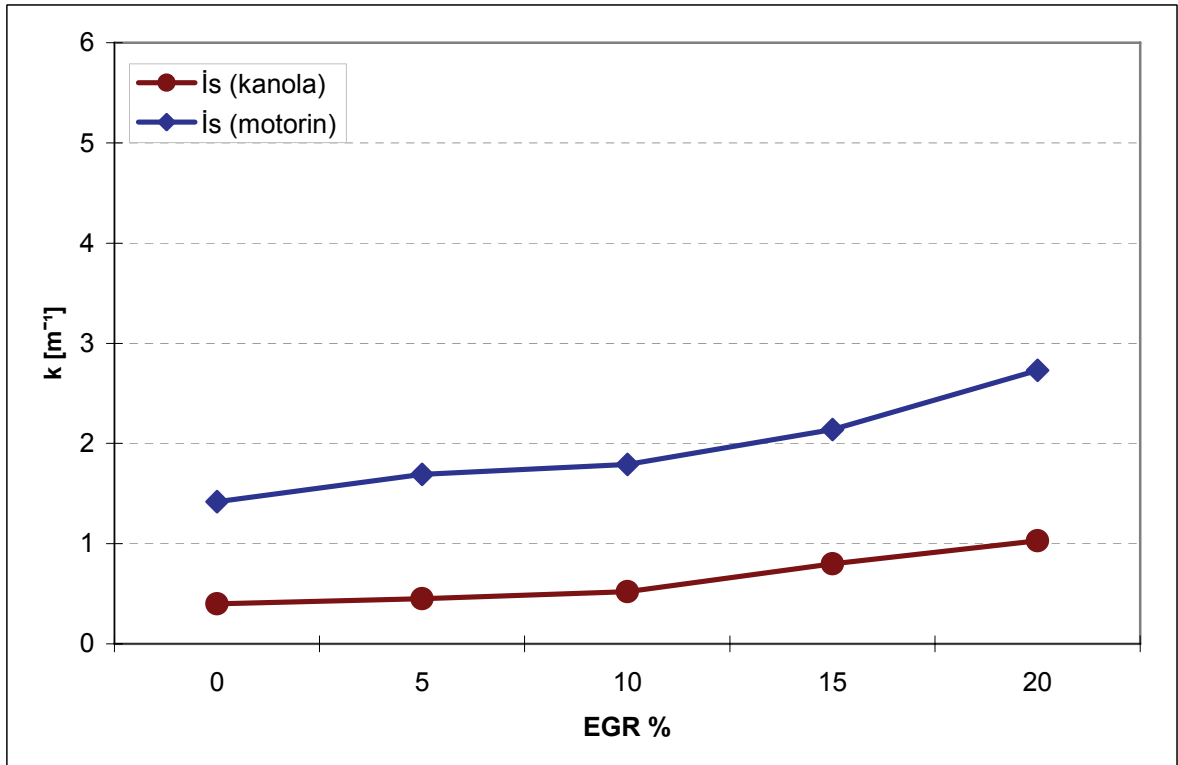
Şekil 7.49 İs emisyonlarının (k) EGR oranına göre değişimi (2000 d/d)



Şekil 7.50 İs emisyonlarının (k) EGR oranına göre değişimi (2500 d/d)

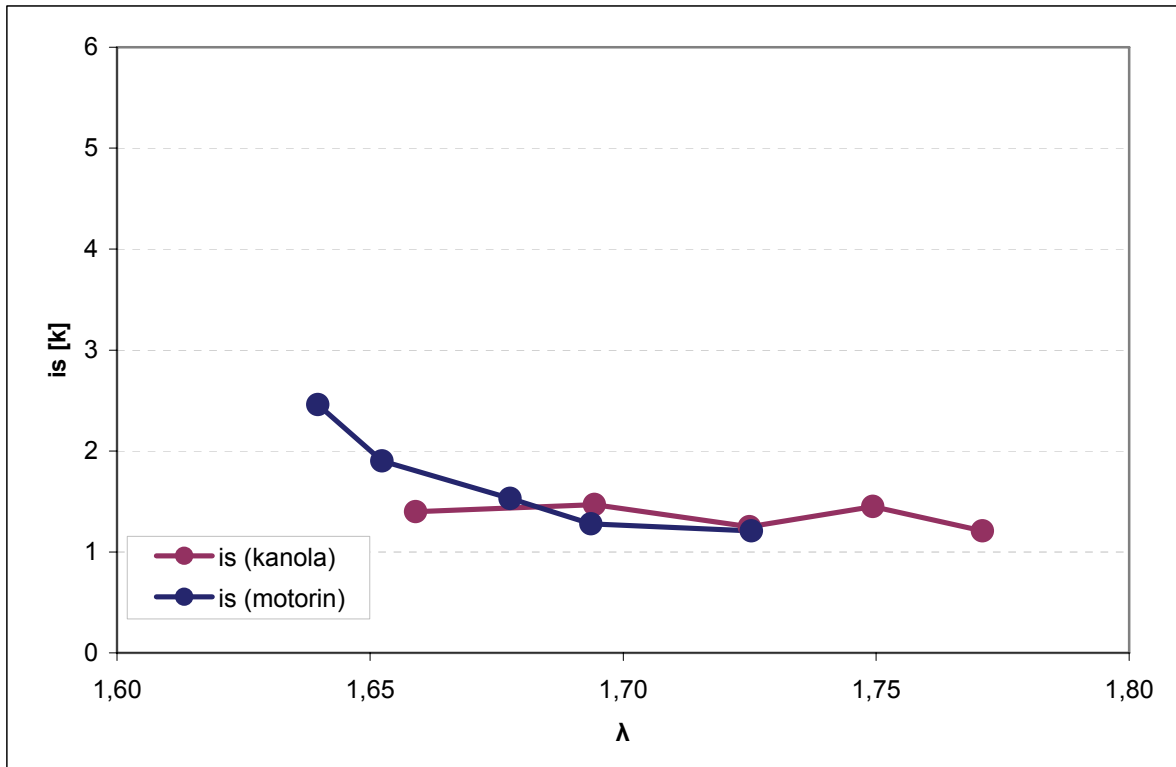


Şekil 7.51 İis emisyonlarının ( $k$ ) EGR oranına göre değişimi (3000 d/d)

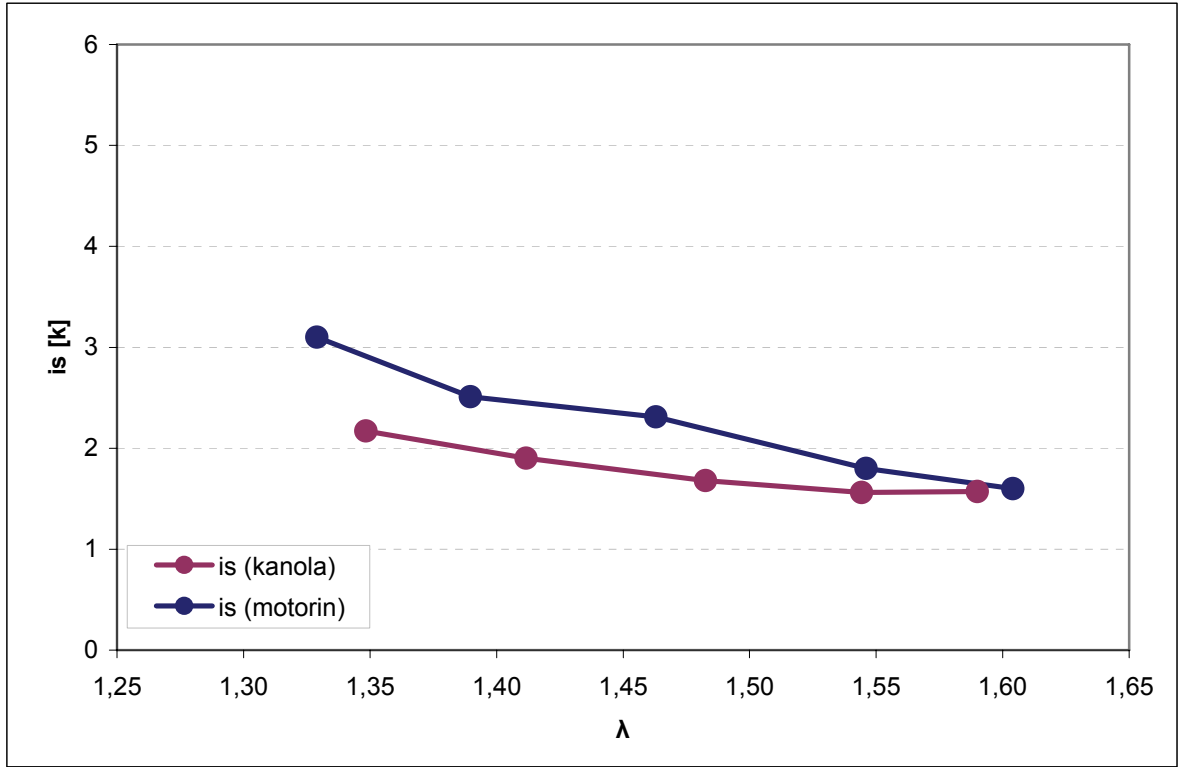


Şekil 7.52 İis emisyonlarının ( $k$ ) EGR oranına göre değişimi (3500 d/d)

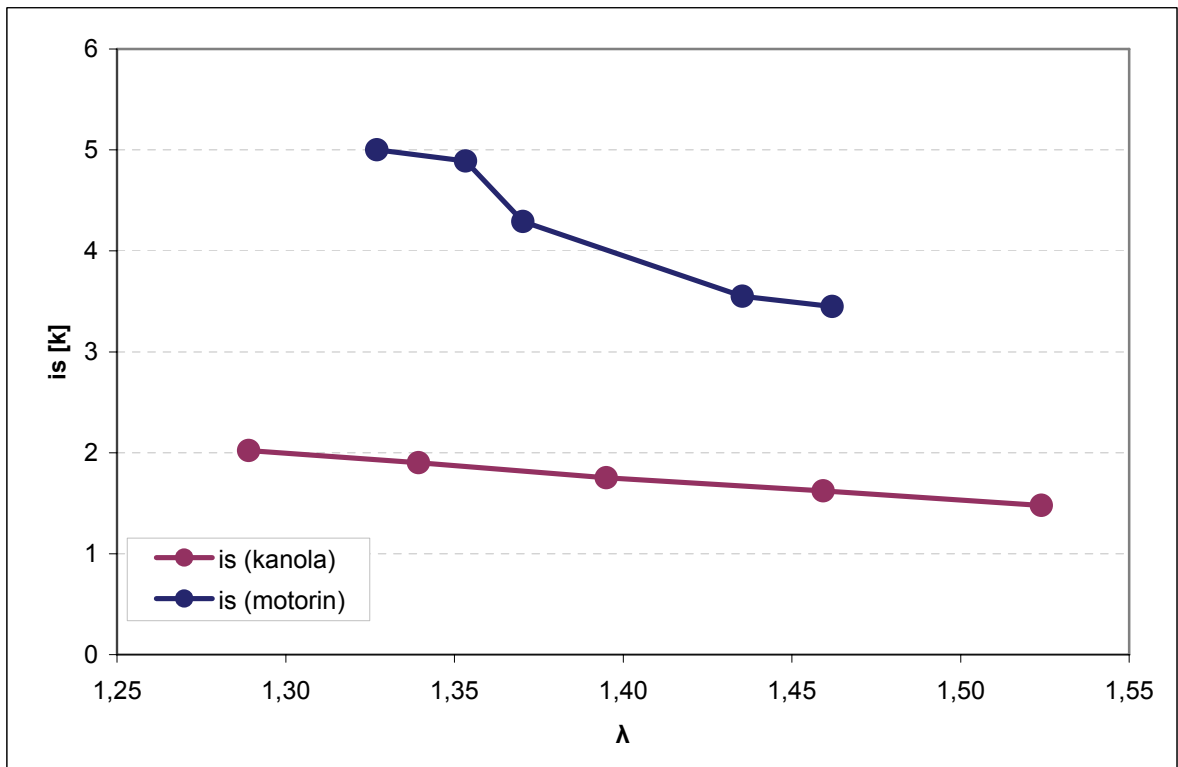
İs açısından kanola yakıtının avantajlı olduğu görülmektedir ki bu literatürle paralel bir sonuçtur. Bu noktada kanola yakıtı içinde bulunan %10 civarındaki oksijen gazının yanmayı iyileştirdiği ve is oluşumunu azaltmada etkili olduğu söylenebilir. EGR uygulaması ile her iki yakıt için is emisyonlarının arttığı gözlenmiştir. Fakat motorinin EGR'ye daha duyarlı olduğu görülmüştür. Kanola biyodizelinin EGR oranının artmasıyla is salımlarında ciddi bir artış meydana getirmemesi EGR'ye yatkınlık açısından en önemli avantajlarından biri olduğu ortadadır.



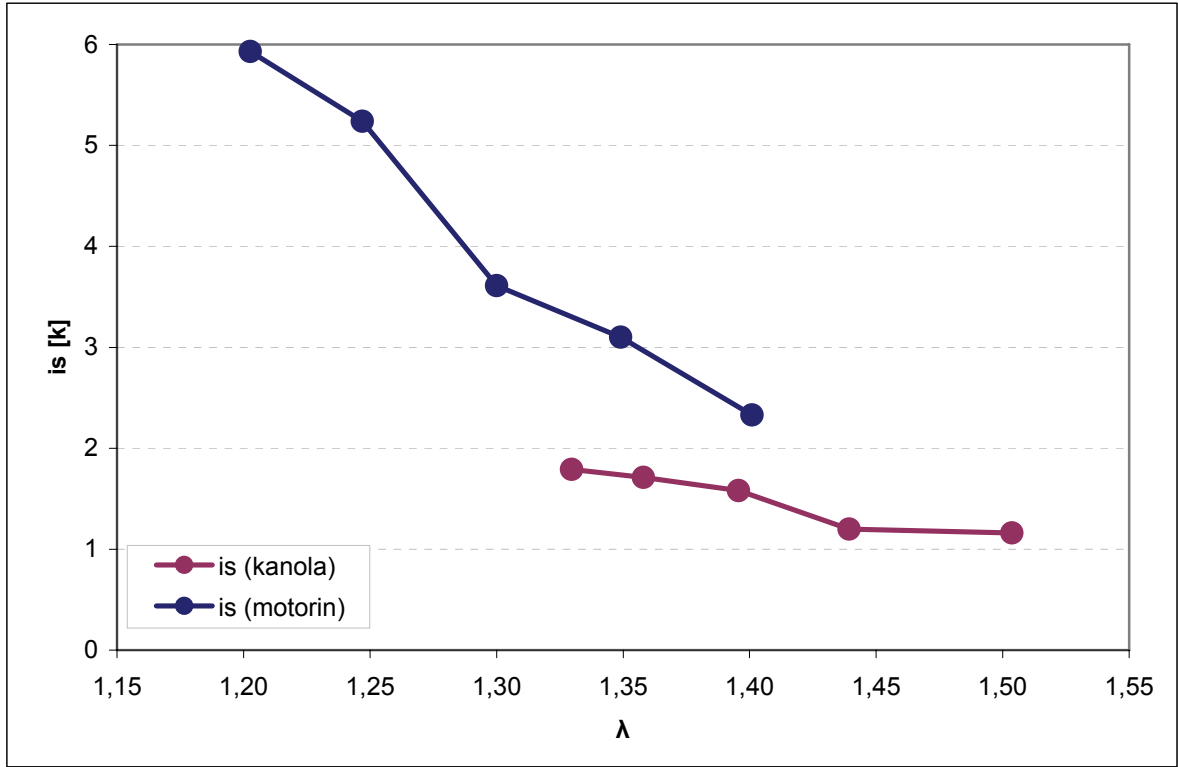
Şekil 7.53 HFK'ya göre absorplama katsayısının (k) değişimi (1000 d/d)



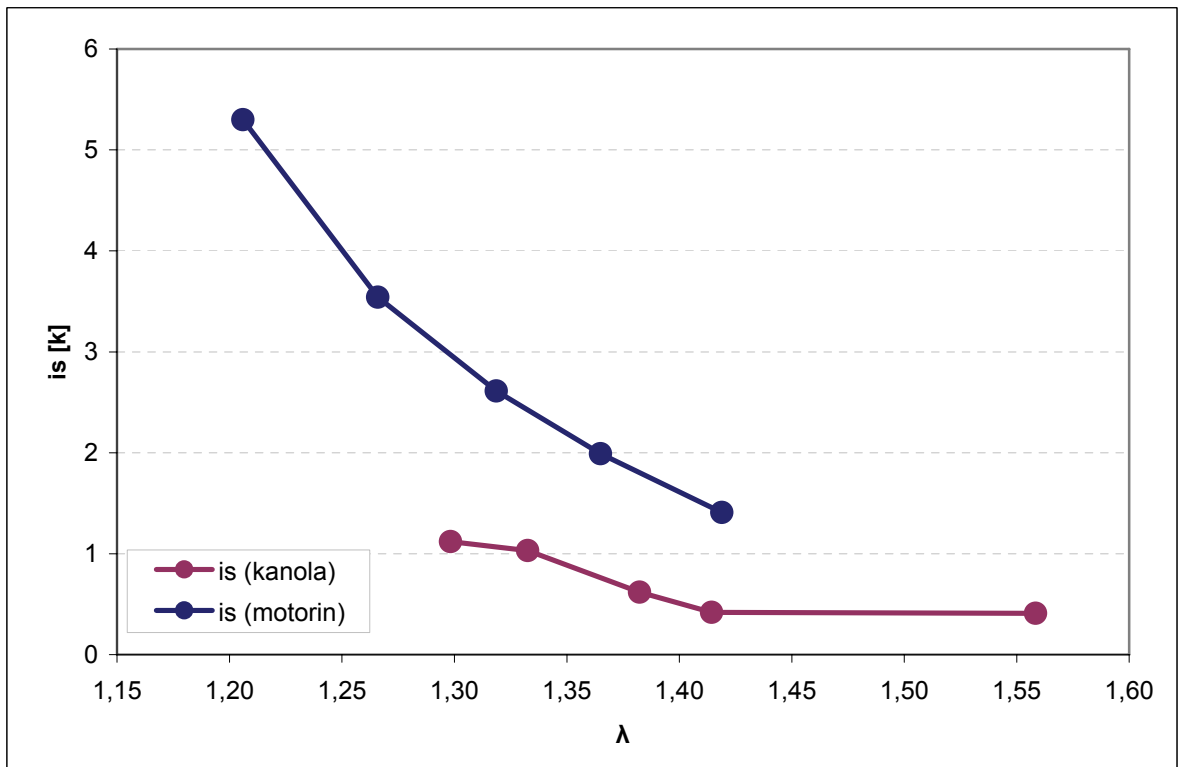
Şekil 7.54 HFK'ya göre absorplama katsayısının (k) değişimi (1500 d/d)



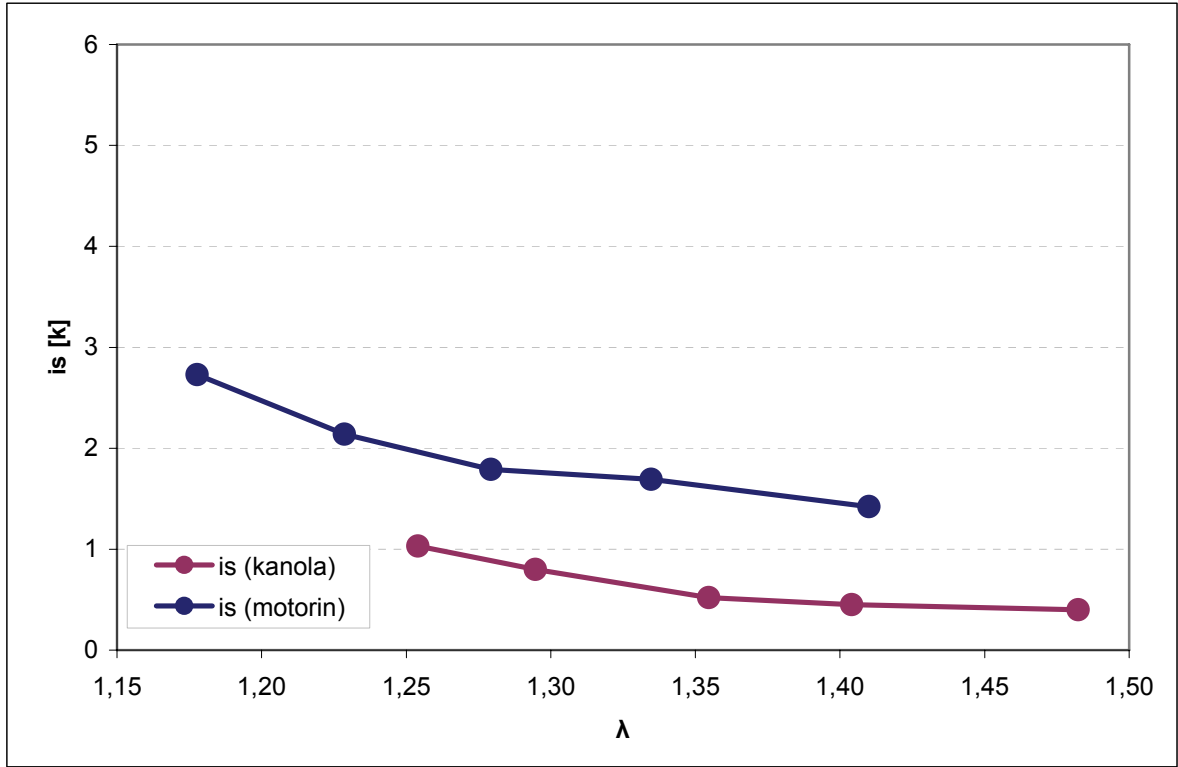
Şekil 7.55 HFK'ya göre absorplama katsayısının (k) değişimi (2000 d/d)



Şekil 7.56 HFK'ya göre absorplama katsayısının (k) değişimi (2500 d/d)



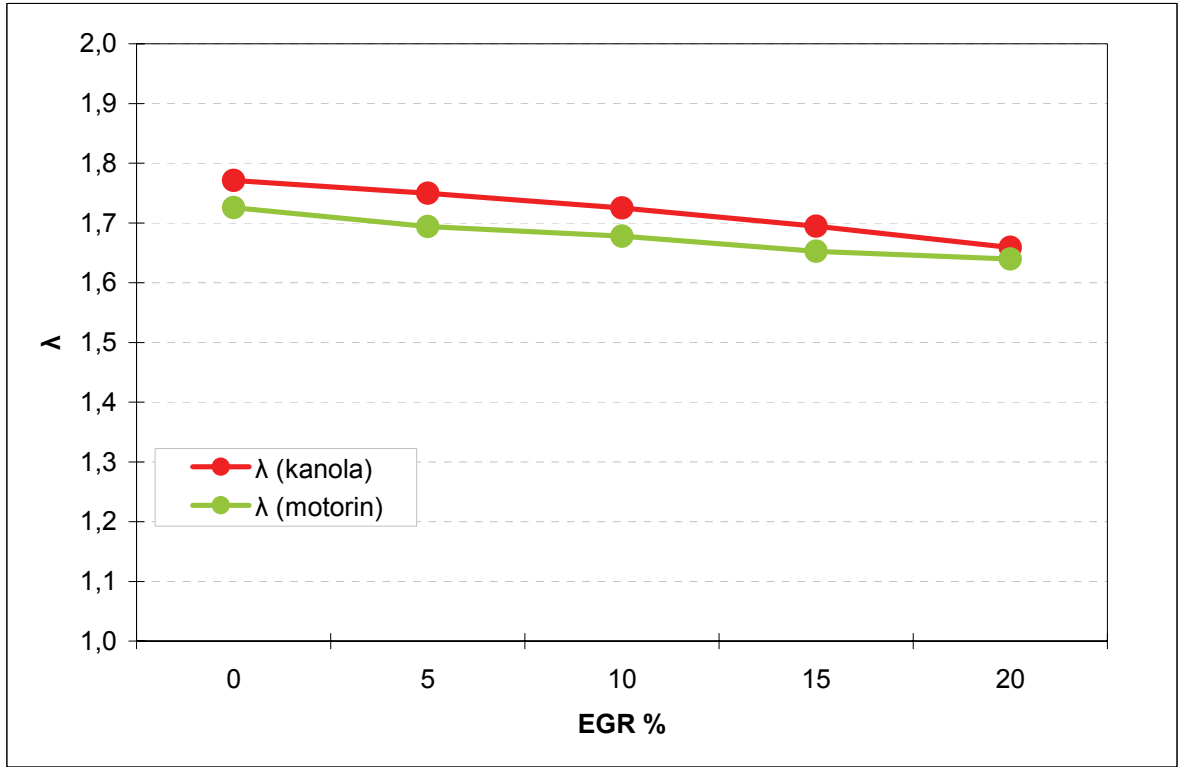
Şekil 7.57 HFK'ya göre absorplama katsayısının (k) değişimi (3000 d/d)



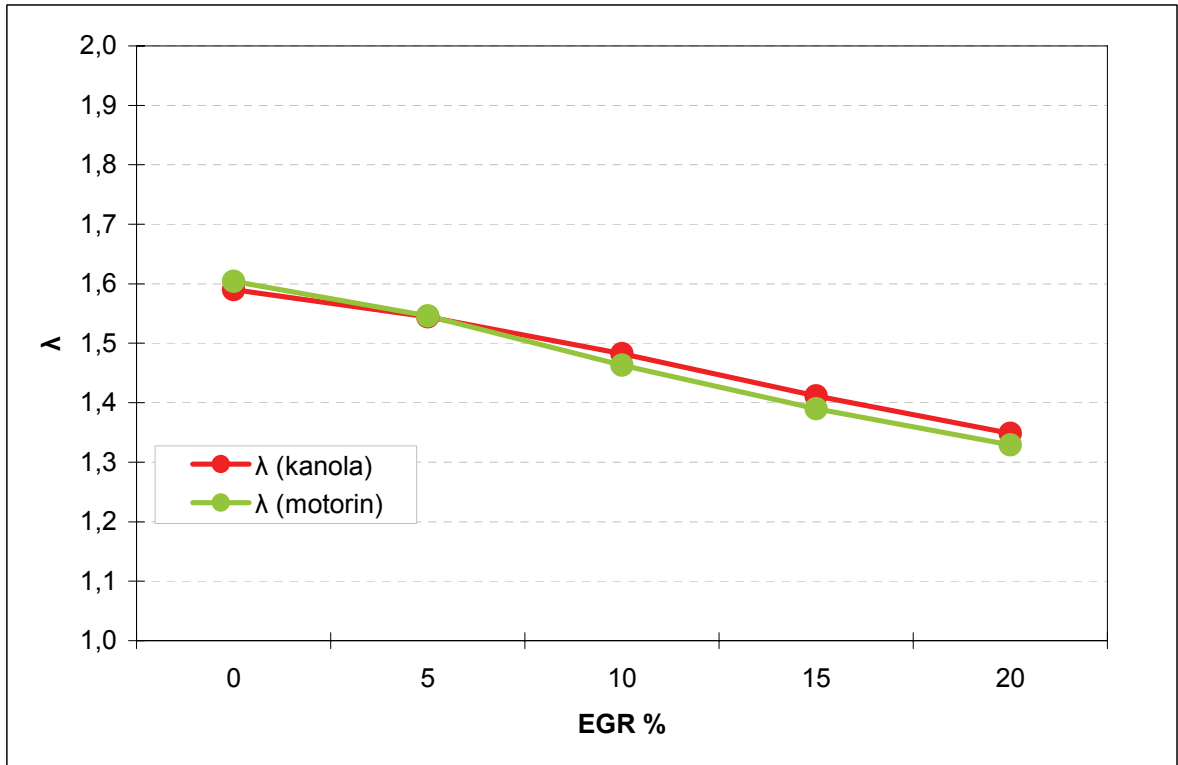
Şekil 7.58 HFK'ya göre absorplama katsayısının (k) değişimi (3500 d/d)

Bütün hızlarda biyodizelin motorinden daha ıssız çalıştığı görülmüştür. Aynı lamda değerlerinde de biyodizel motorinden daha avantajlıdır. EGR ile amaçlanan, lamda değerlerinin düşürülerek NOx oluşumuna sebep olabilecek artık oksijen gazı miktarının azaltılmasıdır. Bu yüzden düşen lamda değerlerinde yakıtların is oluşturma yatkinlığına bakılmalıdır. Bu açıdan bakıldığında düşen lamda değerlerine motorinin çok daha hassas olduğu, biyodizelin ise çok fazla etkilenmediği gözükmektedir. Motorin için %20 EGR oranında düşük devirlerden yükseğe doğru k absorplama katsayısı sırasıyla 2; 1,9; 1,4; 2,5; 3,8 ve 1,9 kat artış gösterirken kanola biyodizeli için 1,2; 1,4; 1,4; 1,5; 2,7 ve 2,6 kat artış göstermiştir. Biyodizel için is emisyonları aynı şart için daha düşük olmanın yanında EGR ile is artış miktarı motorininkinden daha az olmuştur. Biyodizelin is açısından EGR uygulamasında motorine göre daha avantajlı olduğu muhakkaktır.

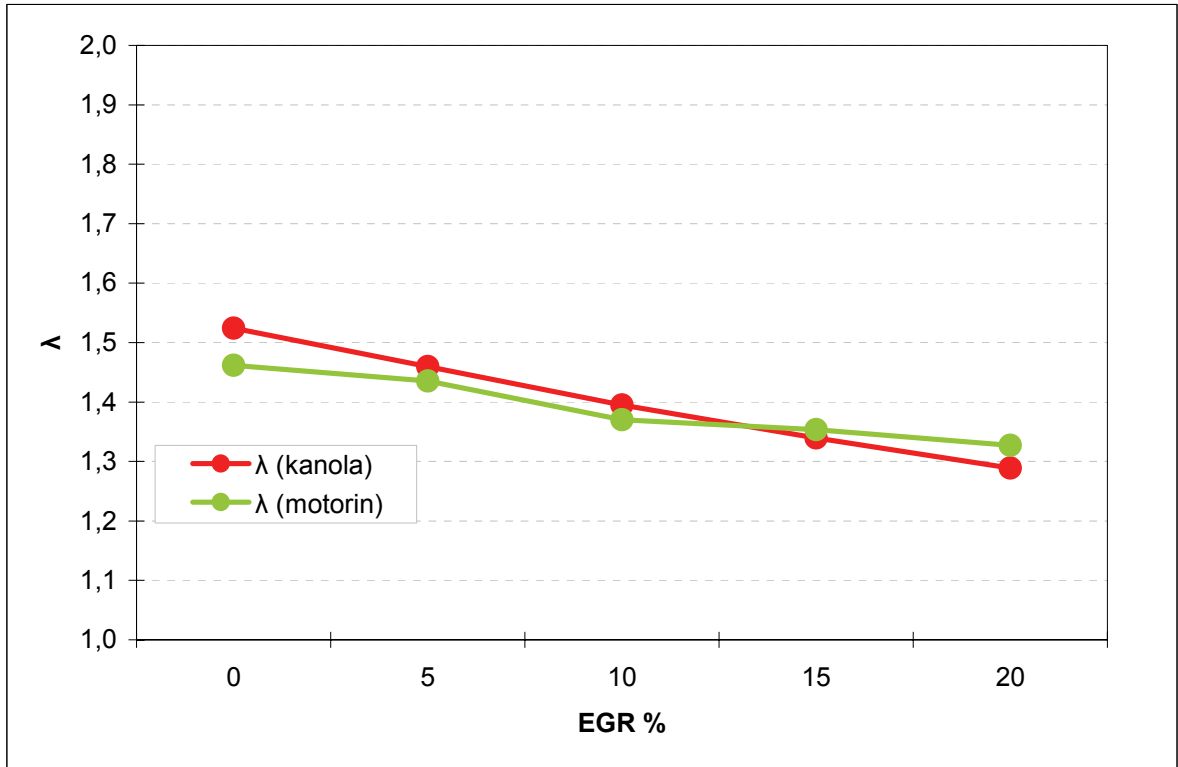
## 7.6 Kirlenici Harici Gaz Grafikleri



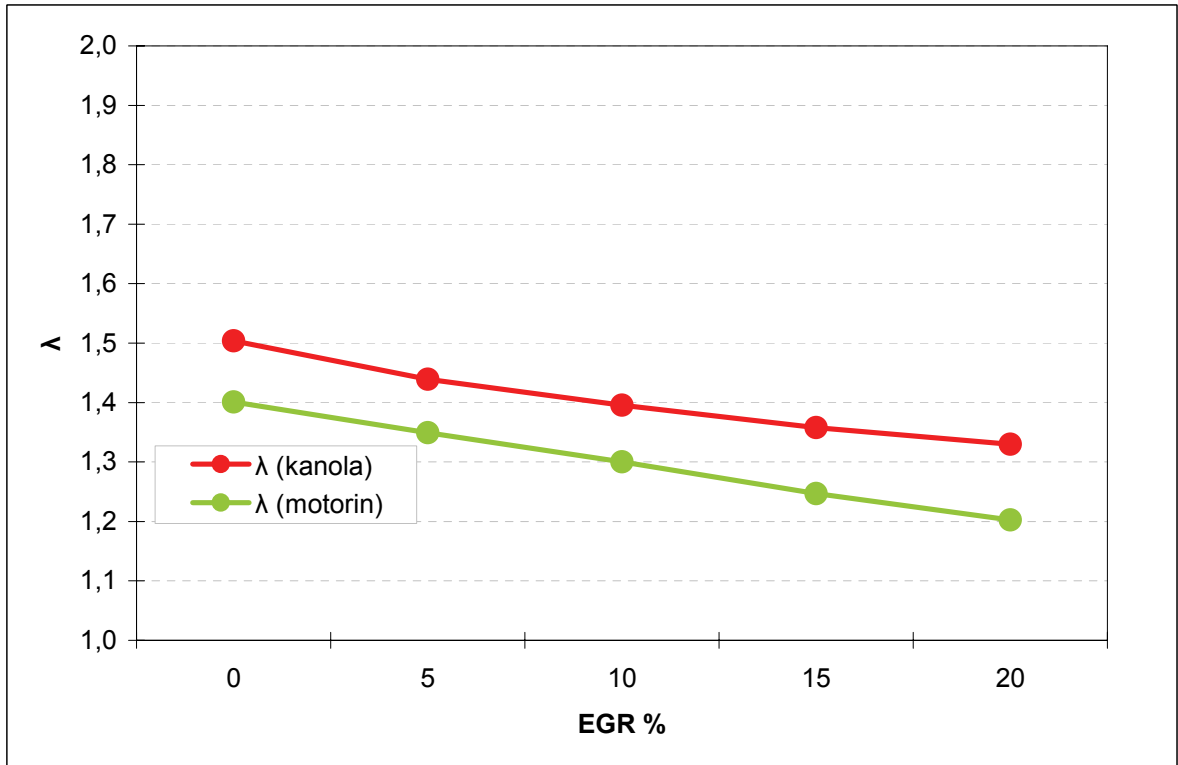
Şekil 7.59 Hava fazlalık katsayısının EGR oranına göre değişimi (1000 d/d)



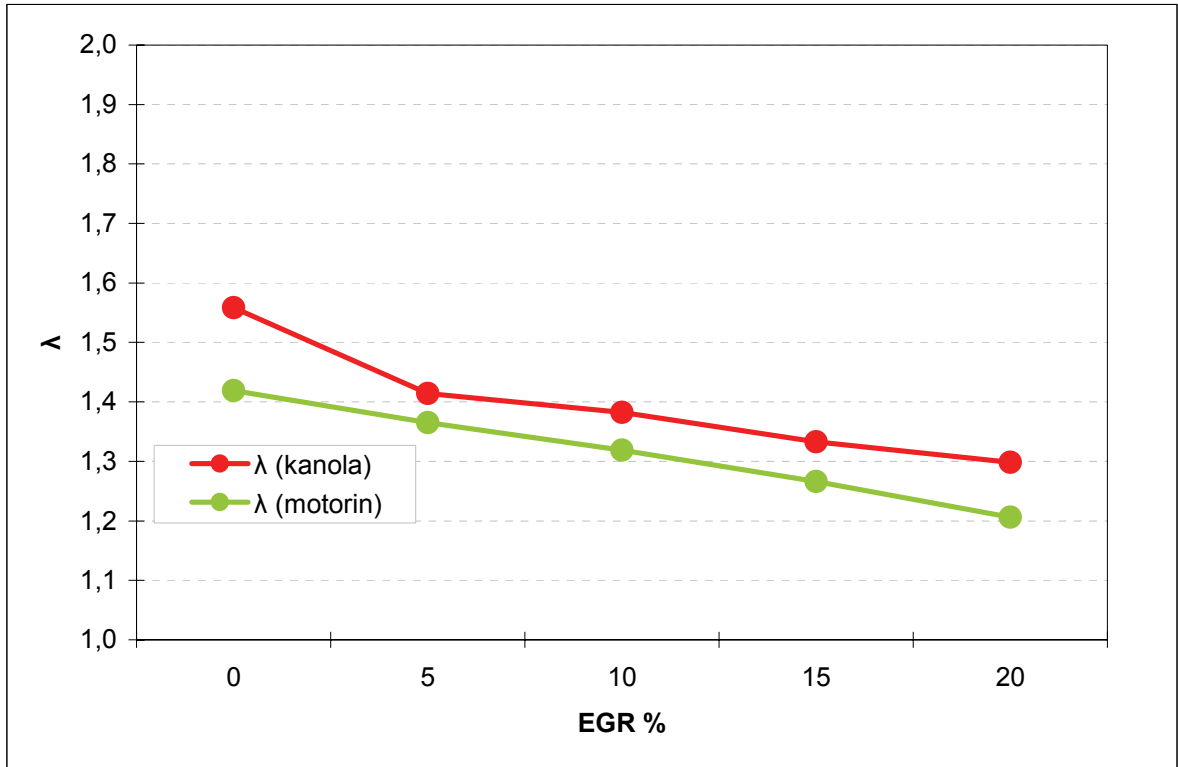
Şekil 7.60 Hava fazlalık katsayısının EGR oranına göre değişimi (1500 d/d)



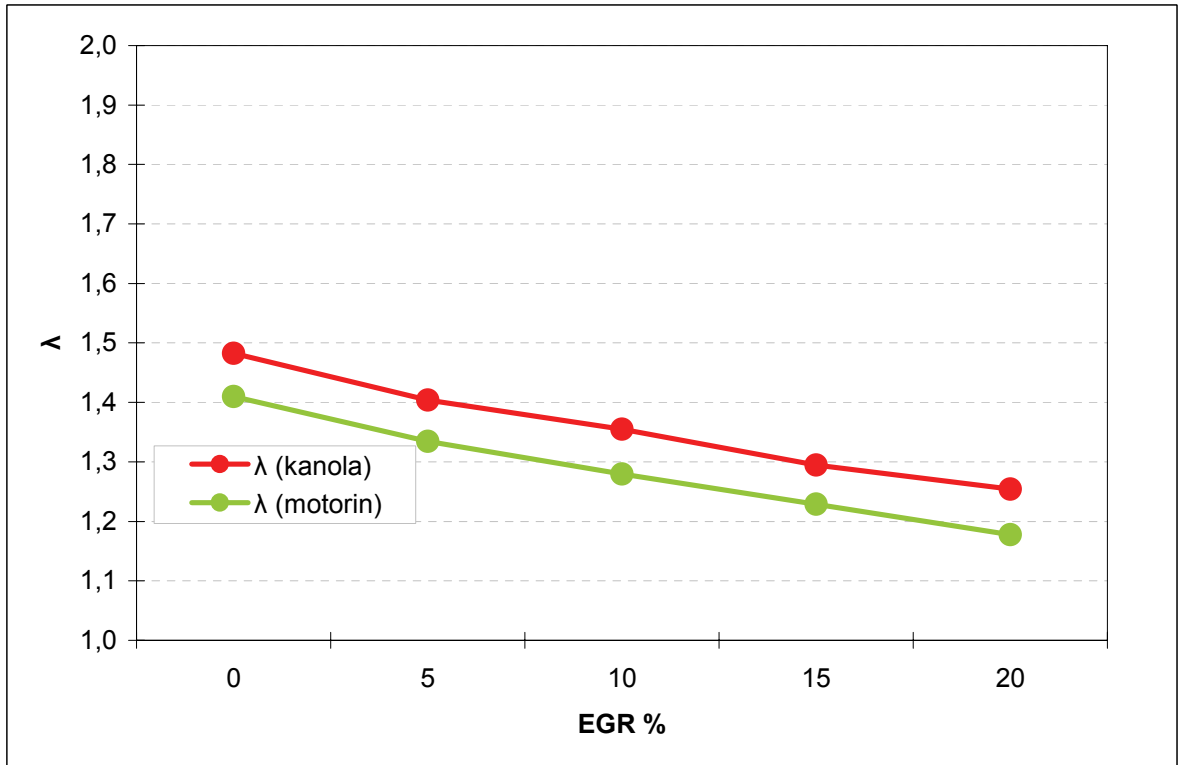
Şekil 7.61 Hava fazlalık katsayısının EGR oranına göre değişimi (2000 d/d)



Şekil 7.62 Hava fazlalık katsayısının EGR oranına göre değişimi (2500 d/d)

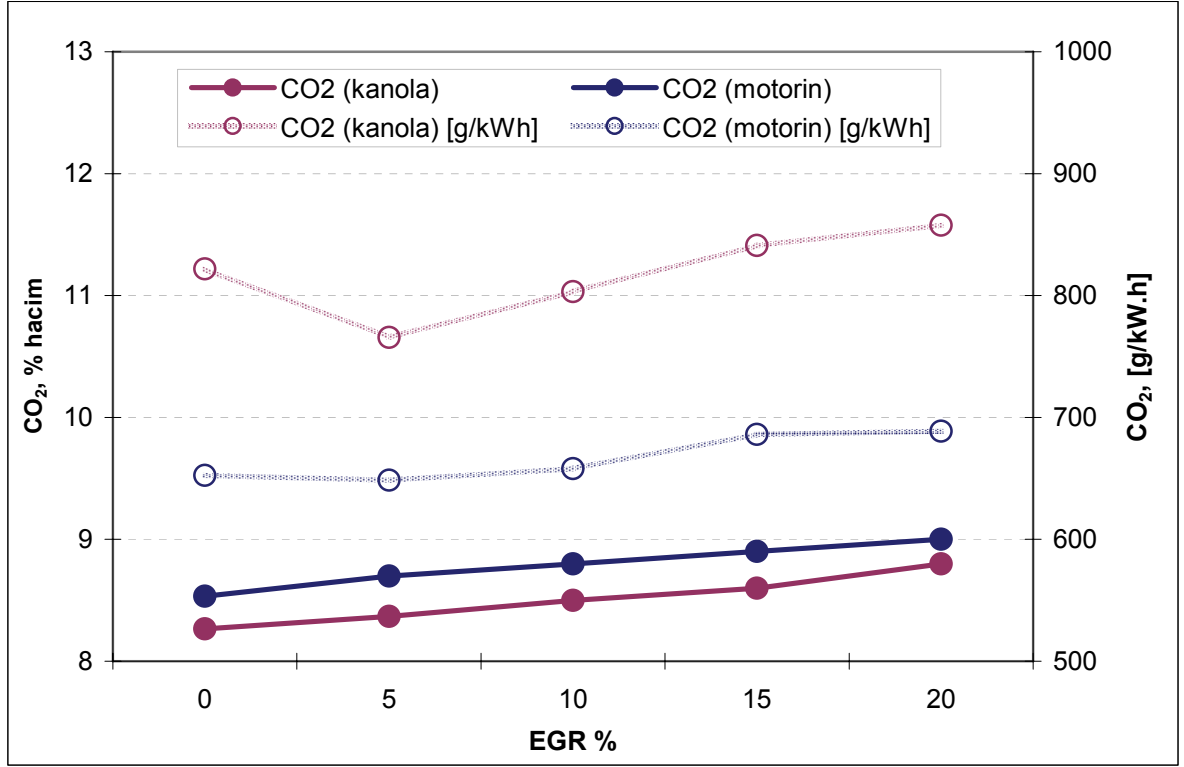


Şekil 7.63 Hava fazlalık katsayısının EGR oranına göre değişimi (3000 d/d)

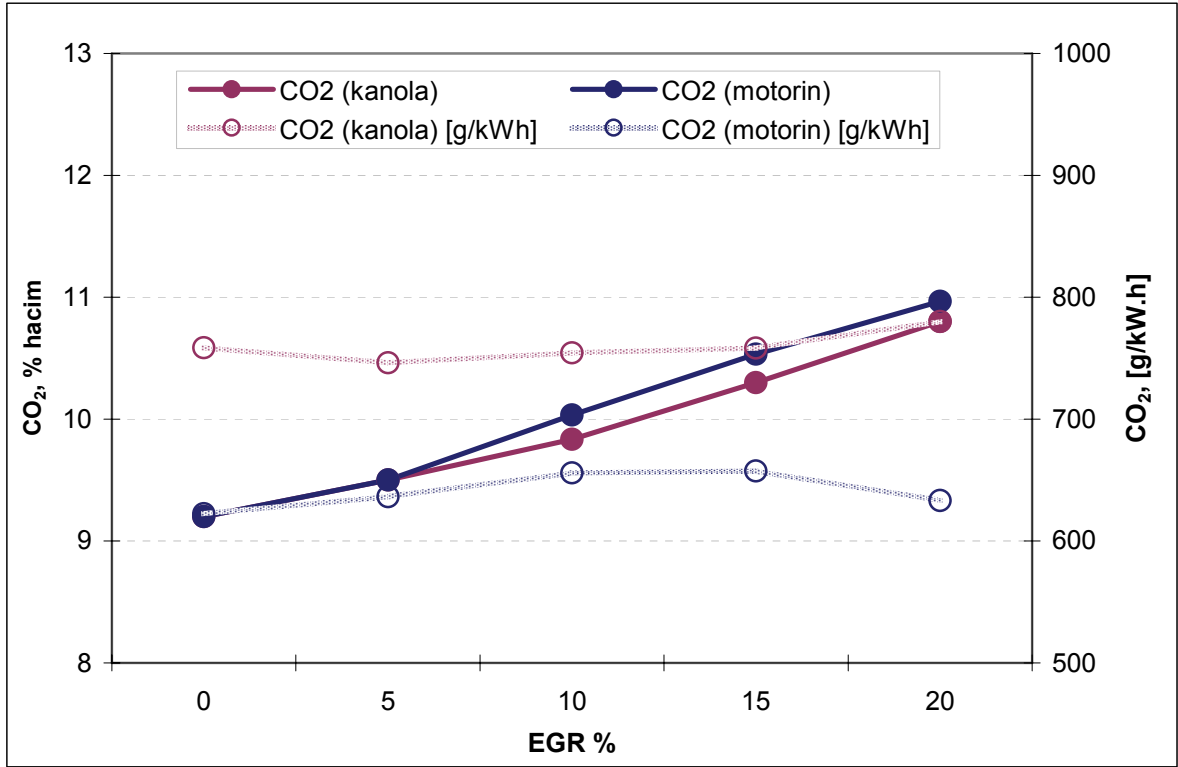


Şekil 7.64 Hava fazlalık katsayısının EGR oranına göre değişimi (3500 d/d)

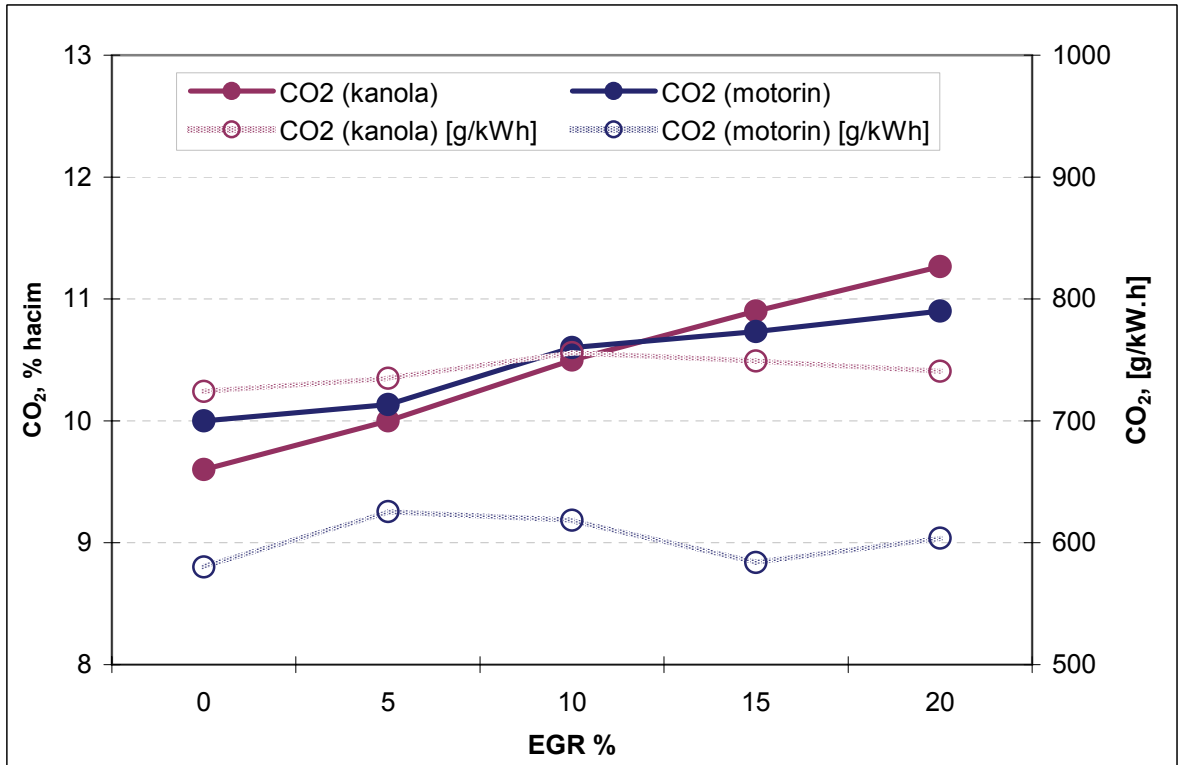
Hava fazlalık katsayısı grafiklerinden anlaşılacağı üzere biyodizelin içeriğindeki oksijen yanma sonu oksijen miktarını da yükselterek yanmanın oksijence zengin karışımla oluşmasına sebep olmaktadır. Kanolanın lamda değerleri bütün devir şartları için motorinden yüksek ise de özellikle 1500 ile 2000 d/d arasında lamda değerleri her iki yakıt için birbirine yakın değerler vermiştir. Yükselen EGR oranıyla birlikte lamda değerleri arasındaki fark artış göstermiştir, lamda değerleri ise lineer bir azalma eğilimi göstermiştir.



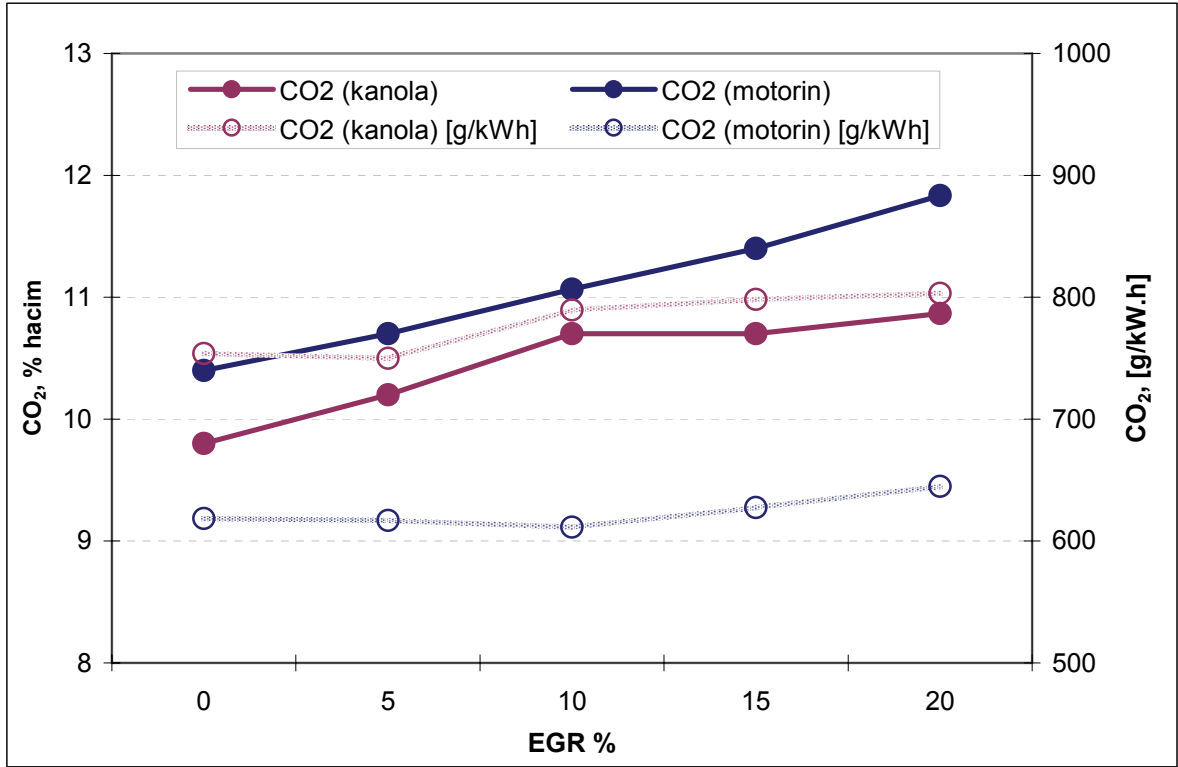
Şekil 7.65 CO<sub>2</sub> emisyonlarının EGR oranına göre değişimi (1000 d/d)



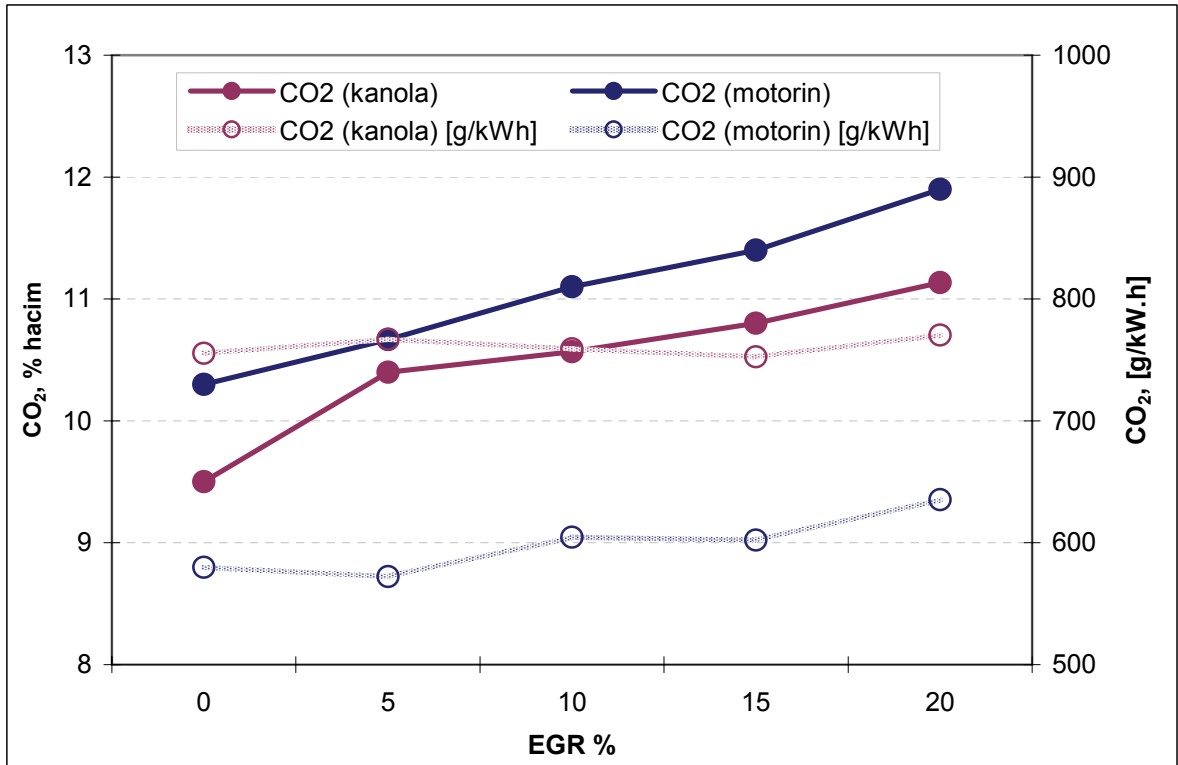
Şekil 7.66 CO<sub>2</sub> emisyonlarının EGR oranına göre değişimi (1500 d/d)



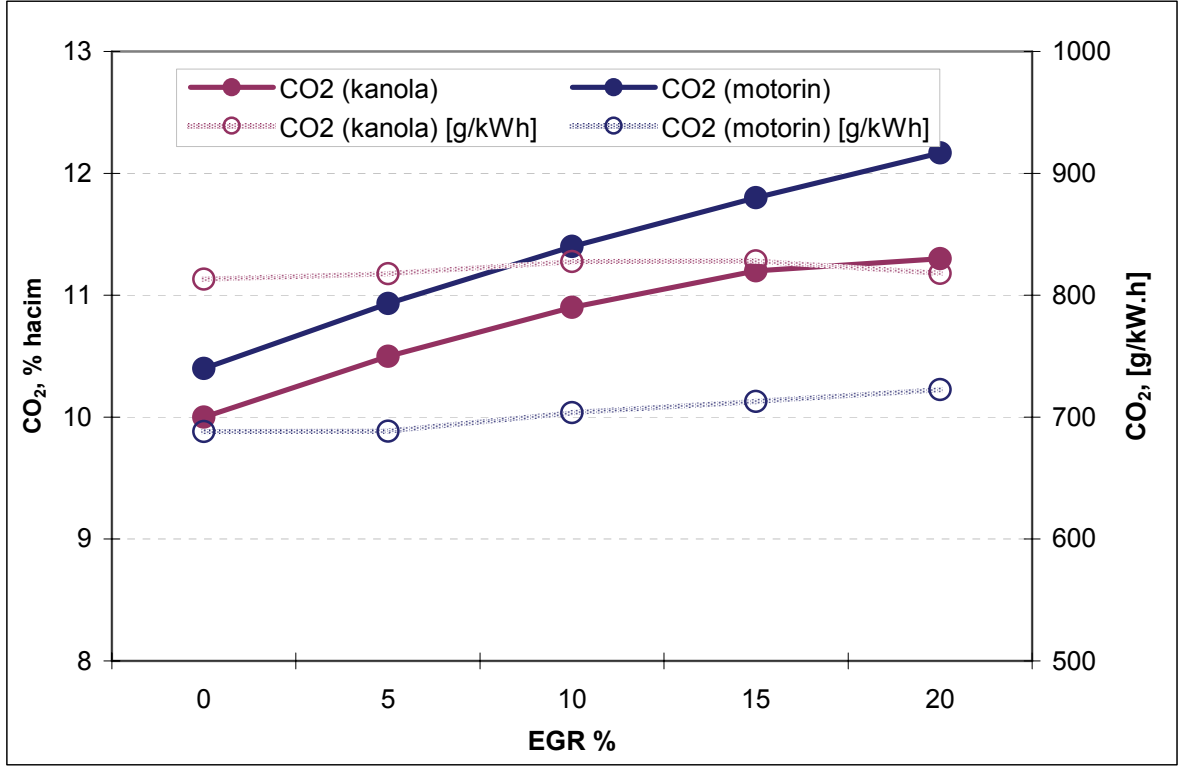
Şekil 7.67 CO<sub>2</sub> emisyonlarının EGR oranına göre değişimi (2000 d/d)



Şekil 7.68 CO<sub>2</sub> emisyonlarının EGR oranına göre değişimi (2500 d/d)



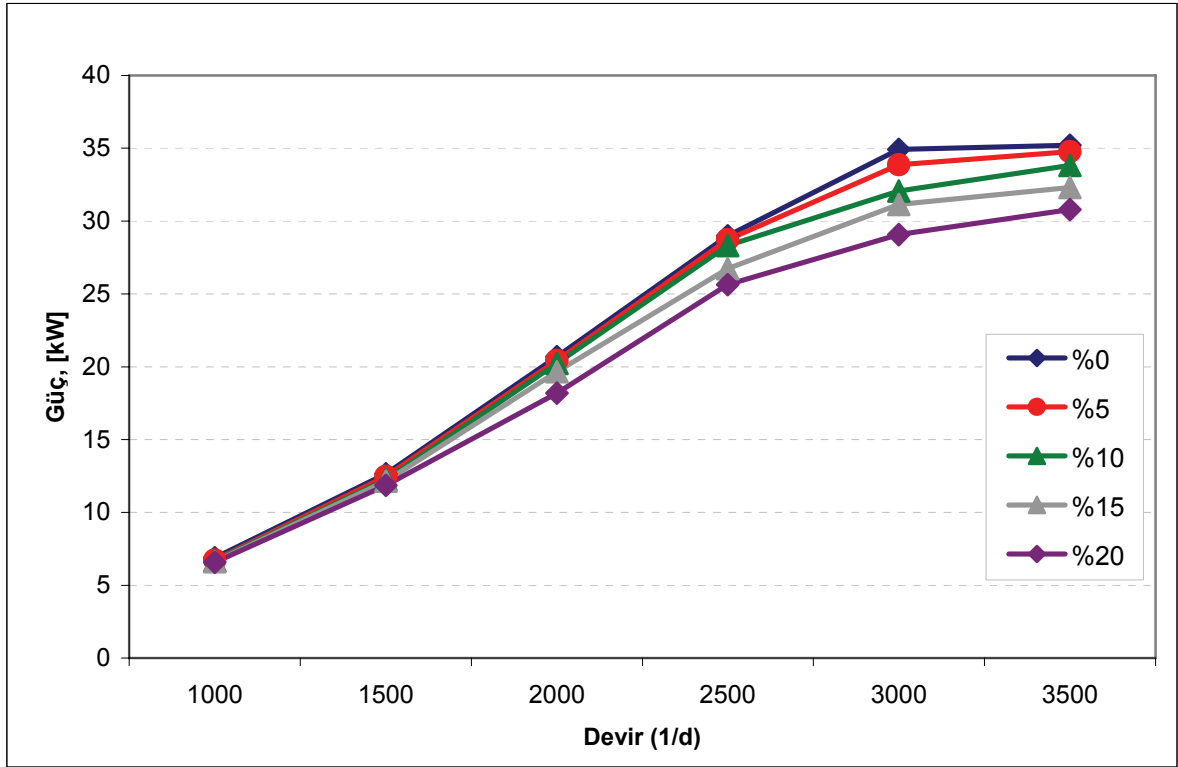
Şekil 7.69 CO<sub>2</sub> emisyonlarının EGR oranına göre değişimi (3000 d/d)



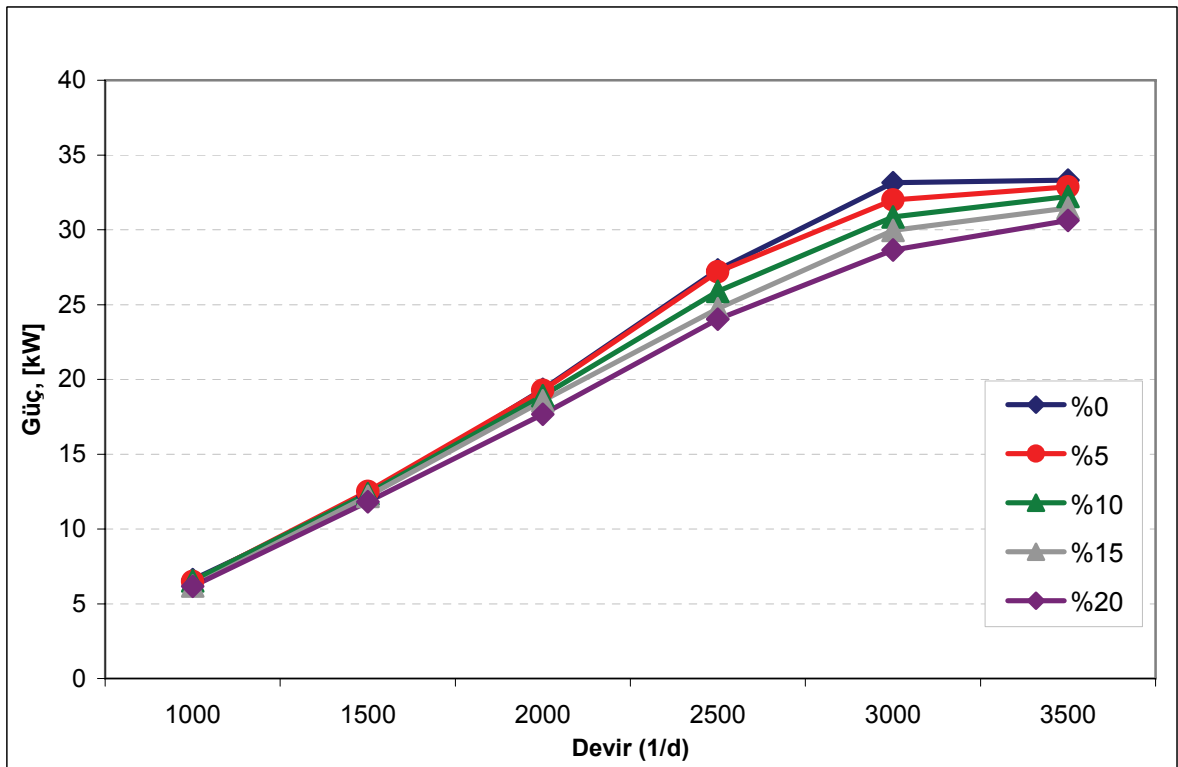
Şekil 7.70 CO<sub>2</sub> emisyonlarının EGR oranına göre değişimi (3500 d/d)

Her ne kadar karbondioksit gazı bir kirletici olarak nitelendirilmese de küresel ısınmaya olan katkısı sebebiyle üreticileri daha düşük CO<sub>2</sub> salan araçlar üretmeye zorlayan yönetmeliklerin uzak olmayan bir gelecekte yürürlüğe girmesi ihtimal dâhilindedir. Bu sebeple CO<sub>2</sub> emisyonları açısından da kanola biyodizelinin incelenmesi gereklidir. Hacimsel bazda bakıldığında motorinin karbondioksit salımı kanolaya nazaran daha fazladır. Bu durum 3000 ve 3500 d/d mertebelerinde daha barizdir. Bu duruma motorinin kanola biyodizeline göre daha yüksek karbon içeriğinin sebep olduğu söylenebilir. Özgül emisyon bazında ise durum kanola biyodizeli aleyhine dönmüştür. Bütün devirler için biyodizelin özgül CO<sub>2</sub> emisyonları motorininkinden ortalama %22 daha fazla olmuştur.

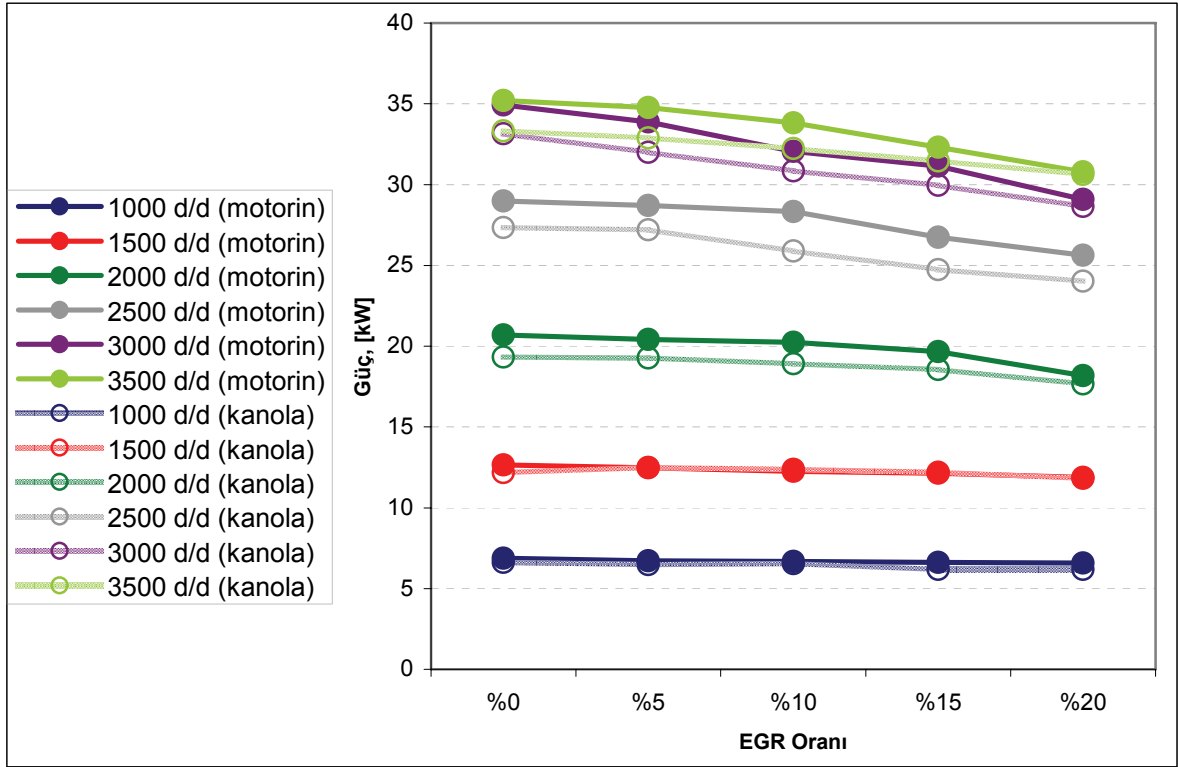
## 7.7 Karşılaştırmalı Grafikler ve Analiz



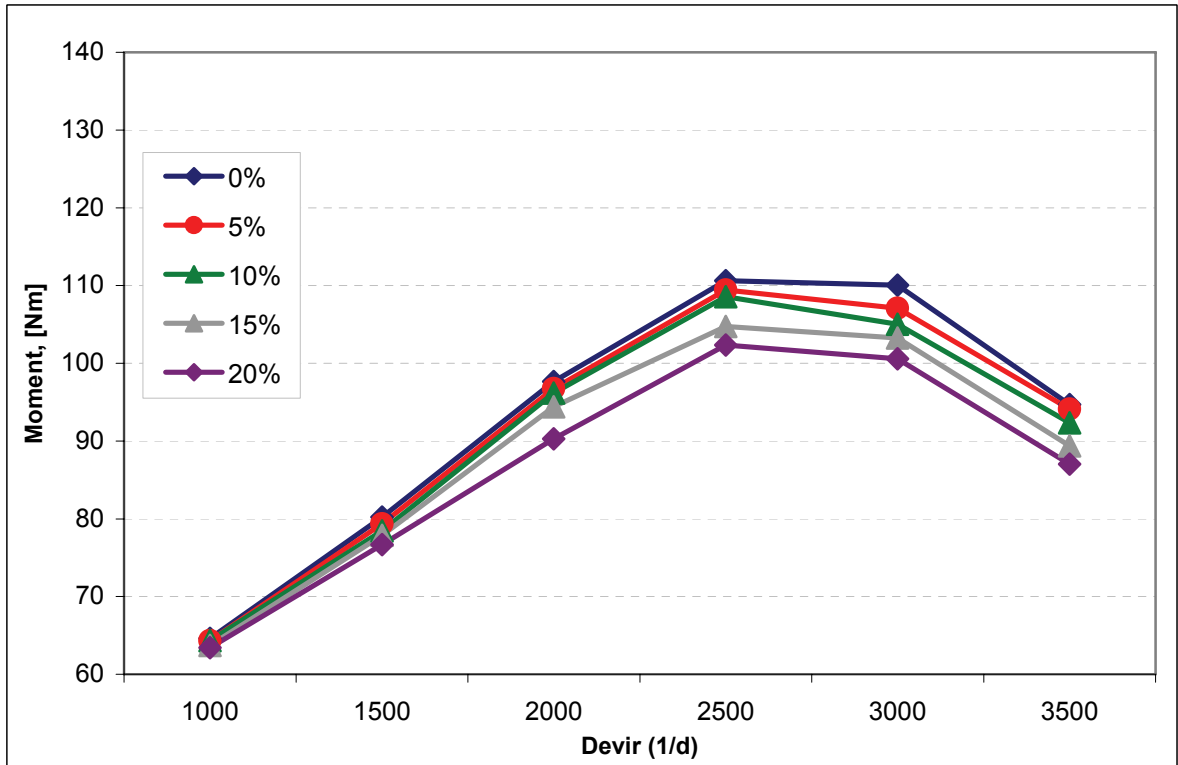
Şekil 7.71 EGR oranlarının motor gücüne etkisi (motorin)



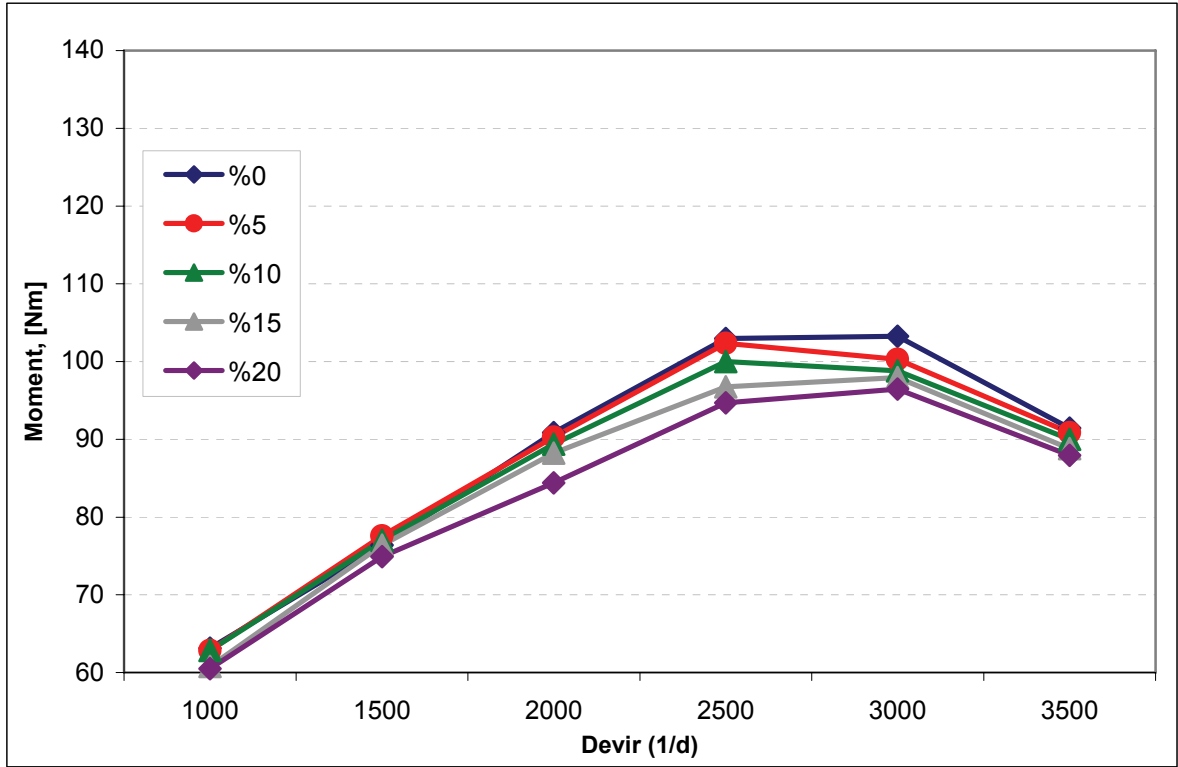
Şekil 7.72 EGR oranlarının motor güce etkisi (kanola)



Şekil 7.73 Devirlere göre EGR oranlarının motor gücüne etkisi

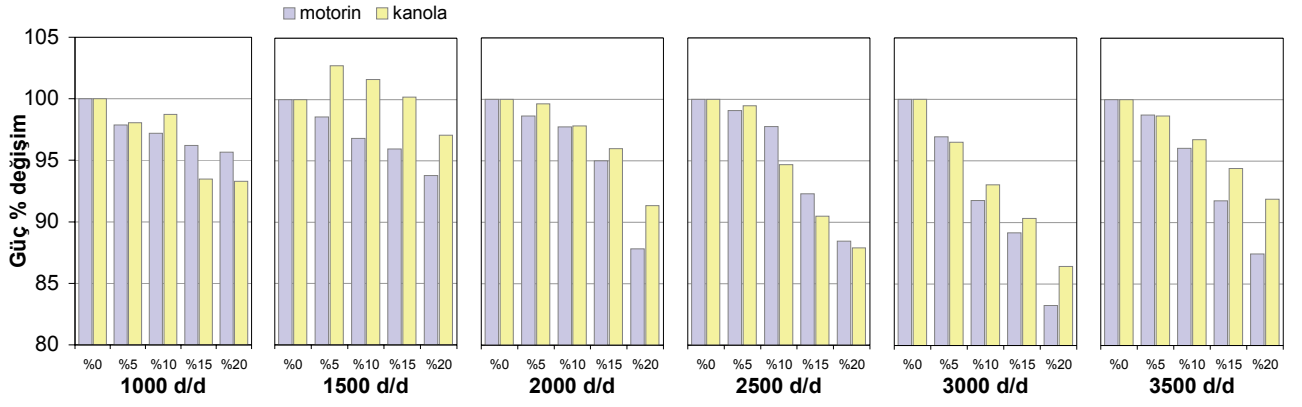


Şekil 7.74 EGR oranlarının momente etkisi (motorin)

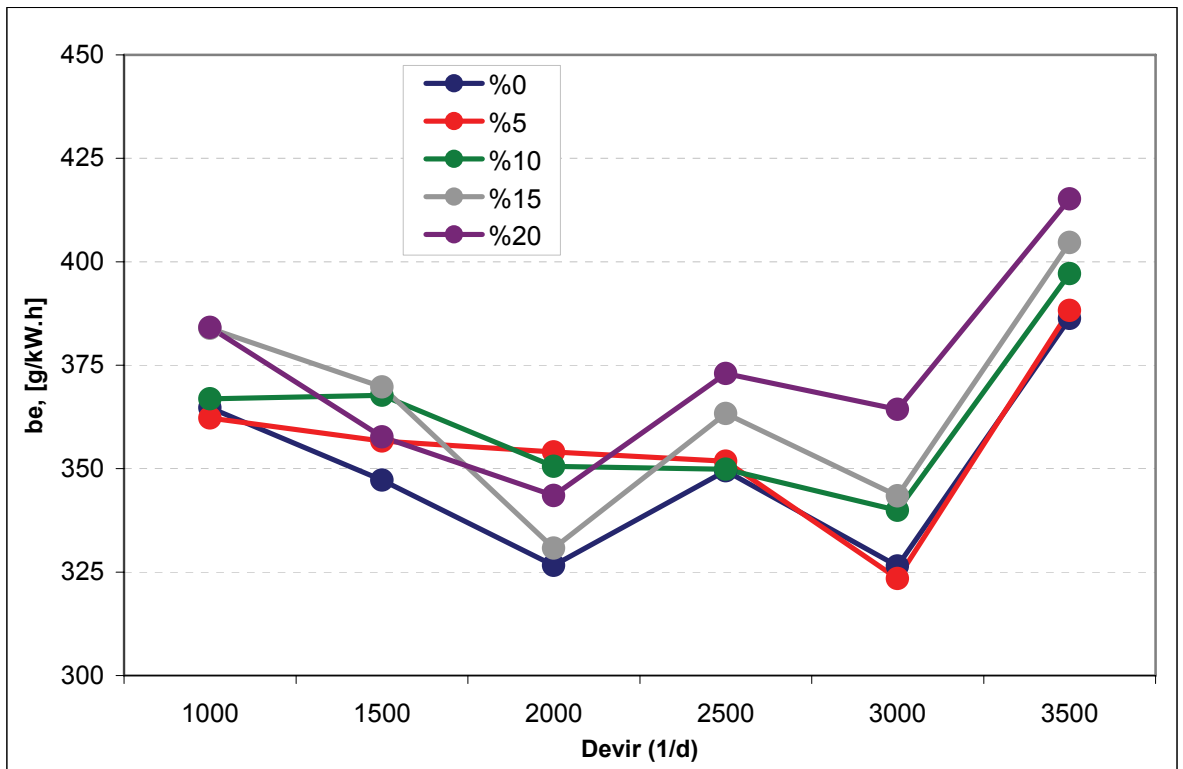


Şekil 7.75 EGR oranlarının momente etkisi (kanola)

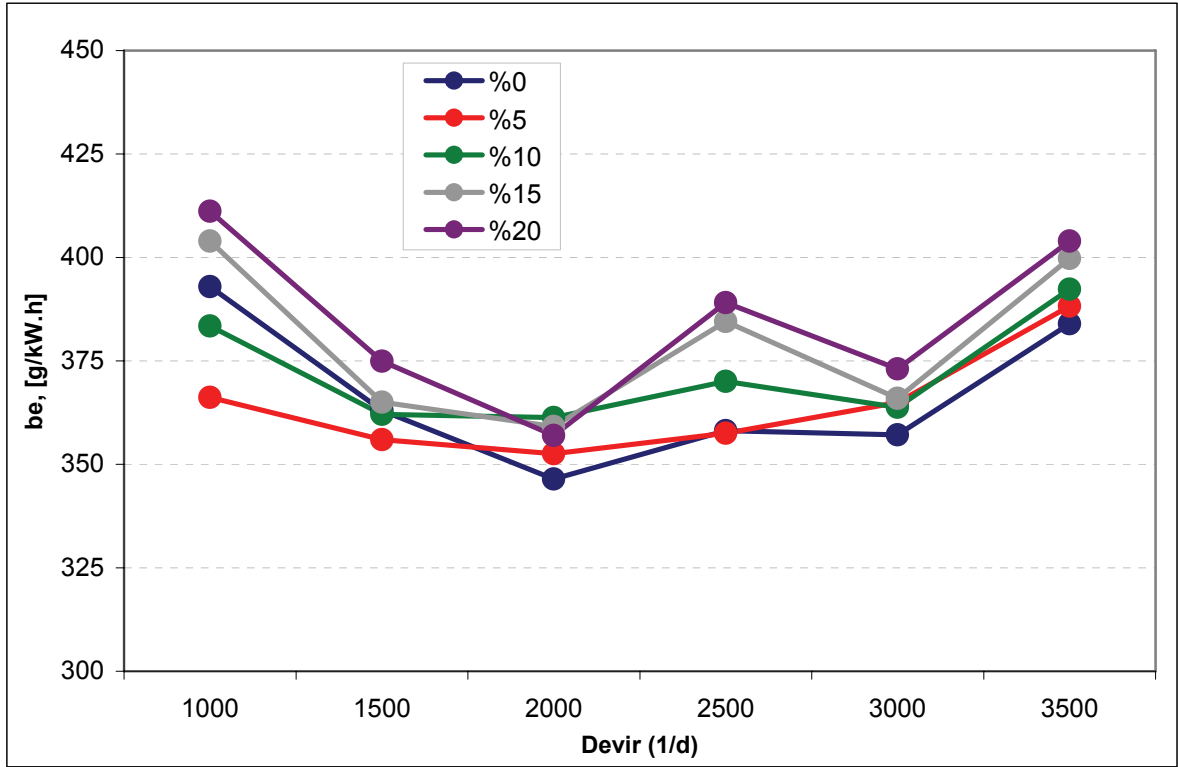
Güç değişimlerine bakıldığında yükselen hızlarla birlikte EGR oranının güce olumsuz etkisi çok daha fazla hissediliyor. 1000 d/d hızında %20 EGR oranına kadar güçte önemli bir düşüş görülmezken her iki yakıt için EGR oranlarının en yüksek güç kaybına sebep olduğu motor hızı 3000 d/d olarak belirlenmiştir. Yukarıdaki grafiklerden, EGR yapıldığında güçte meydana gelen düşüşün linear bir karakterde olduğu anlaşılmaktadır. Motorin kullanıldığında en büyük güç kaybının 3000 d/d - %20 EGR şartında %16.8, kanola biyodizelinde ise 3000 d/d - %20 EGR şartında %13.6 mertebesinde olduğu görülmektedir. Güç açısından kanola biyodizelinin EGR uygulamalarında motorine nazaran daha avantajlı olduğu belirlenmiştir.



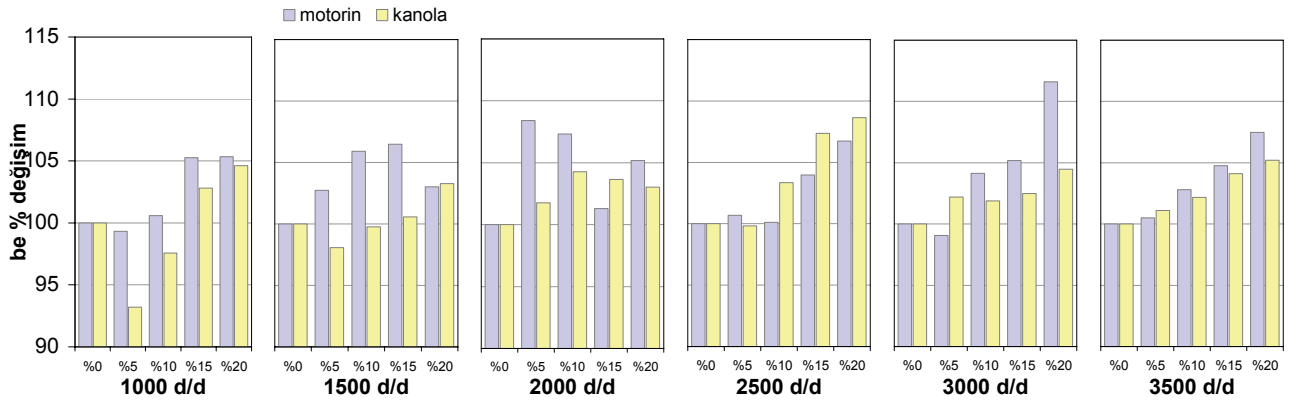
Şekil 7.76 Devirlere göre EGR oranlarının efektif güce etkisi



Şekil 7.77 Devirlere göre EGR oranlarının özgül yakıt tüketimine etkisi (motorin)

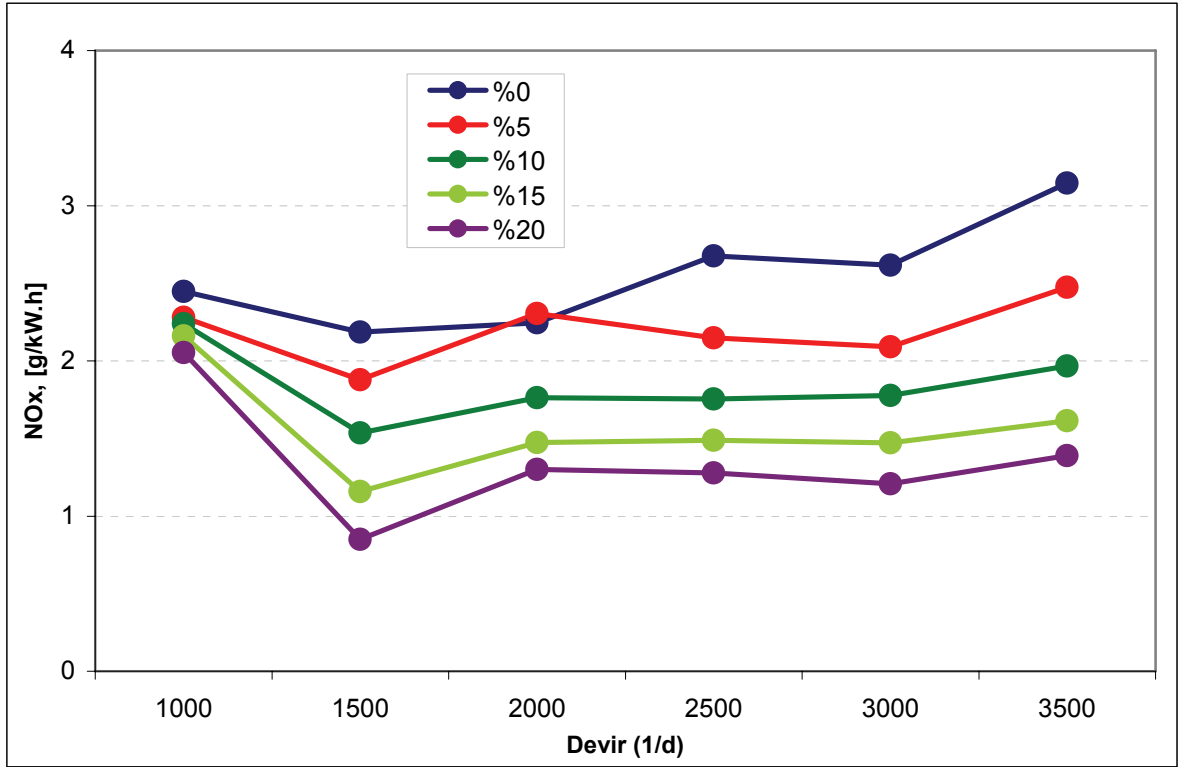


Şekil 7.78 Devirlere göre EGR oranlarının özgül yakıt tüketimine etkisi (kanola)

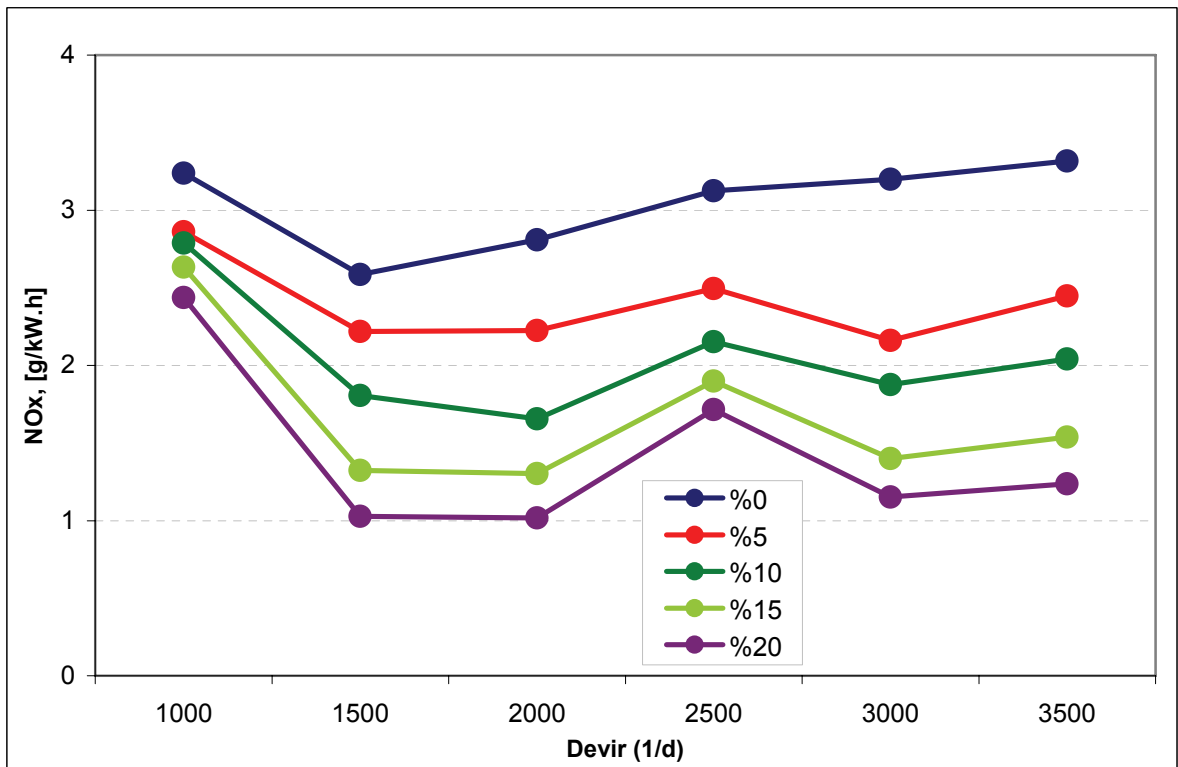


Şekil 7.79 Devirlere göre EGR oranlarının özgül yakıt tüketimine etkisi

Özgül yakıt tüketimi grafiklerinden göze çarpan en önemli sonuç biyodizel için %5 oranında yapılan EGR'nin düşük ve orta hızlarda yakıt tüketimine olumlu katkıda bulunmuş olmasıdır. Bu durum motorinde sadece düşük hızlarda mevcuttur. Bu neticeyi sıcak egzoz gazlarının ısıyla buharlaşmanın iyileşmesi, bunun da daha iyi bir karışım teşkiline sebebiyet vermesi şeklinde açıklamak mümkündür. Bunun yanında maksimum moment devir olan 2500 d/d haricindeki bütün devirlerde yakıt tüketimindeki artış biyodizel lehinedir.



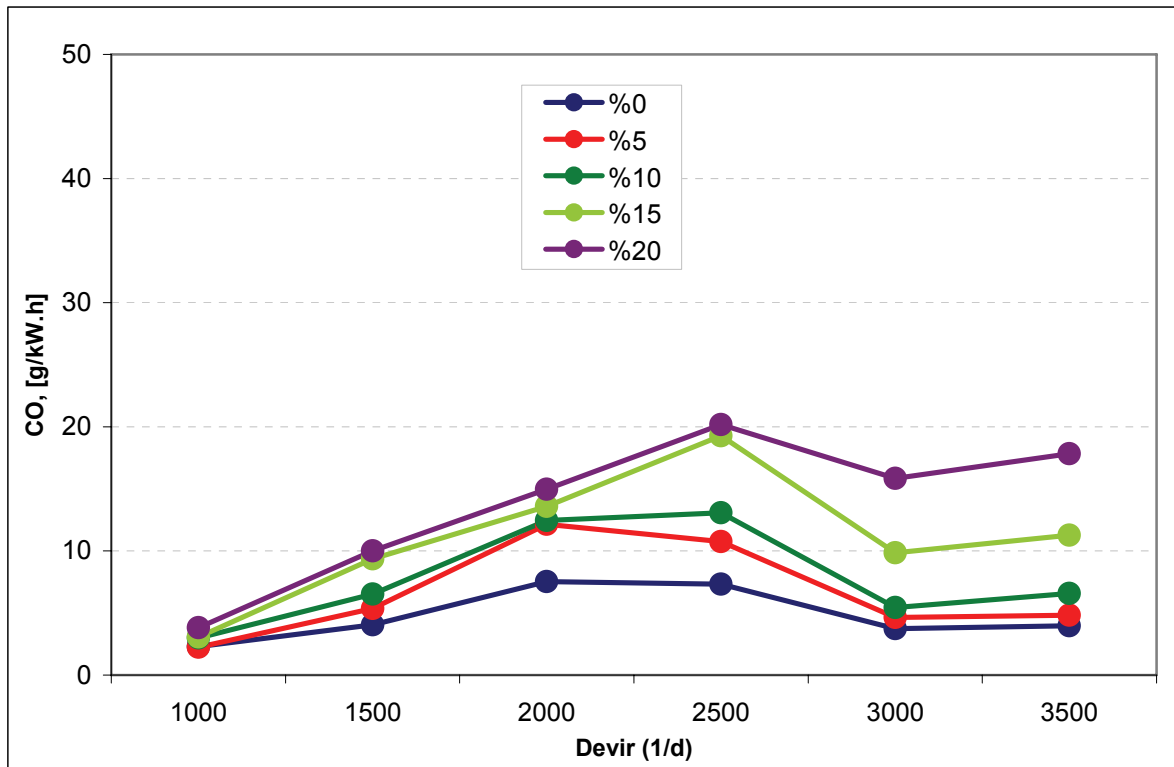
Şekil 7.80 Devirlere göre EGR oranlarının NOx emisyonlarına etkisi (motorin)



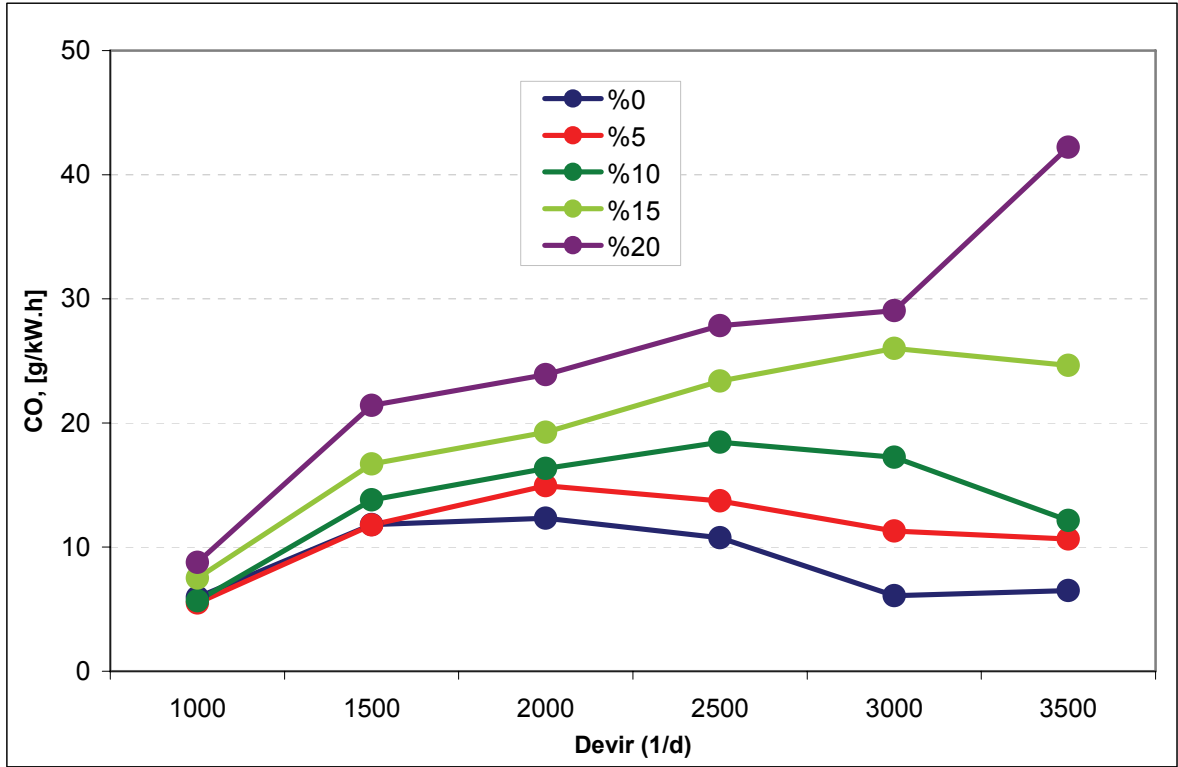
Şekil 7.81 Devirlere göre EGR oranlarının NOx emisyonlarına etkisi (kanola)

Özgül NOx emisyonları açısından kanola biyodizelinin en düşük değerleri 1500 ve 2000 d/d arasında kaydedilirken kanolanın en düşük değerleri 1500 d/d hızında kaydedilmiştir. Motor motorin ile çalıştırıldığında NOx emisyonları %20 EGR ile 1500 d/d'da 2.19'dan 0.85 g/kWh, maksimum moment devrinde 2.25'ten 1.3 g/kWh, Maksimum güç devrinde 3.14'ten 1.39 g/kWh değerine düşmüştür. Yakıt olarak kanola biyodizeli kullanıldığında ise 1500 d/d'da 2.59'dan 1.03 g/kWh, maksimum moment devrinde 2.81'den 1.02 g/kWh, maksimum güç devrinde ise 3.32'den 1.24 g/kWh değerlerine düşüş kaydedilmiştir.

EGR oranlarında kaydedilen değişikliklerin ortalamaları alındığında %5 EGR ile motorin ile %13.22, kanolada elde edilen düşüş ise %20.92, %10 EGR oranında sırasıyla %27.29 ve %32.68, %15 EGR oranında %38.32 ve %45.05, %20 EGR oranında %46.88 ve %53.42 değerleri ölçülmüştür. Kanolanın EGR kullanımıyla NOx azaltmada motorine göre daha avantajlı olduğu aşikârdır.

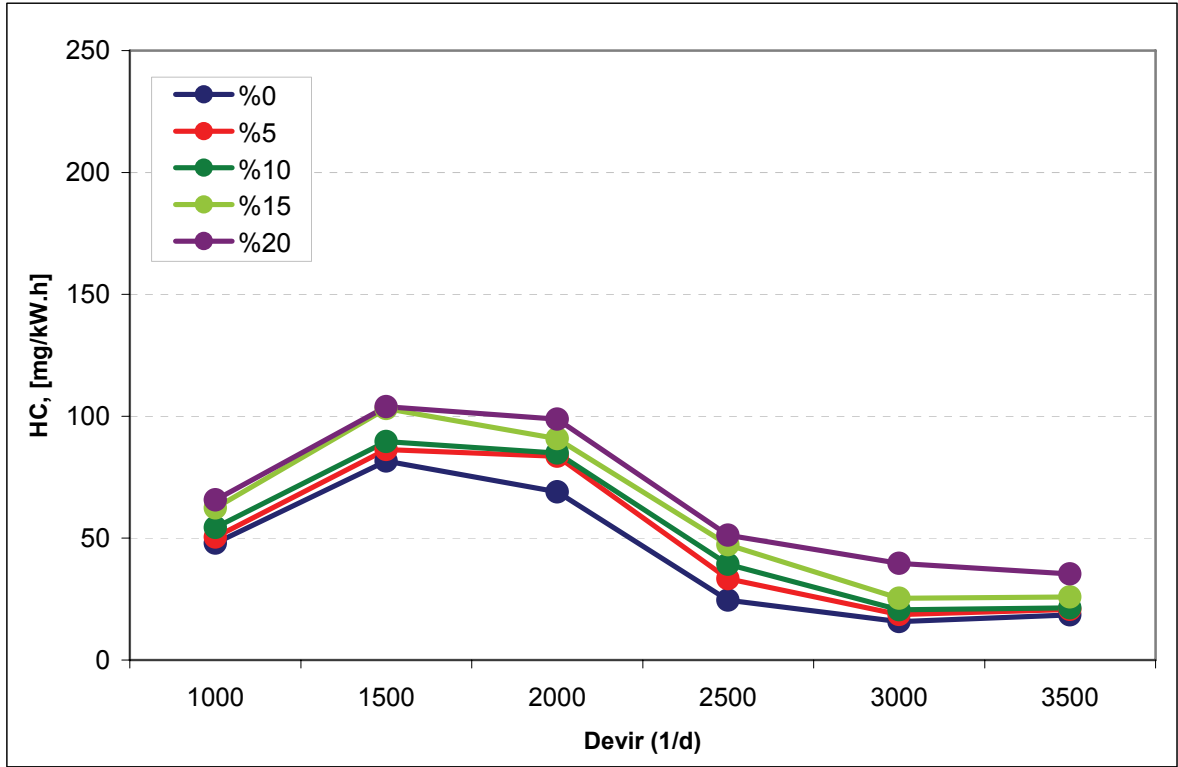


Şekil 7.82 Devirlere göre EGR oranlarının CO emisyonlarına etkisi (motorin)

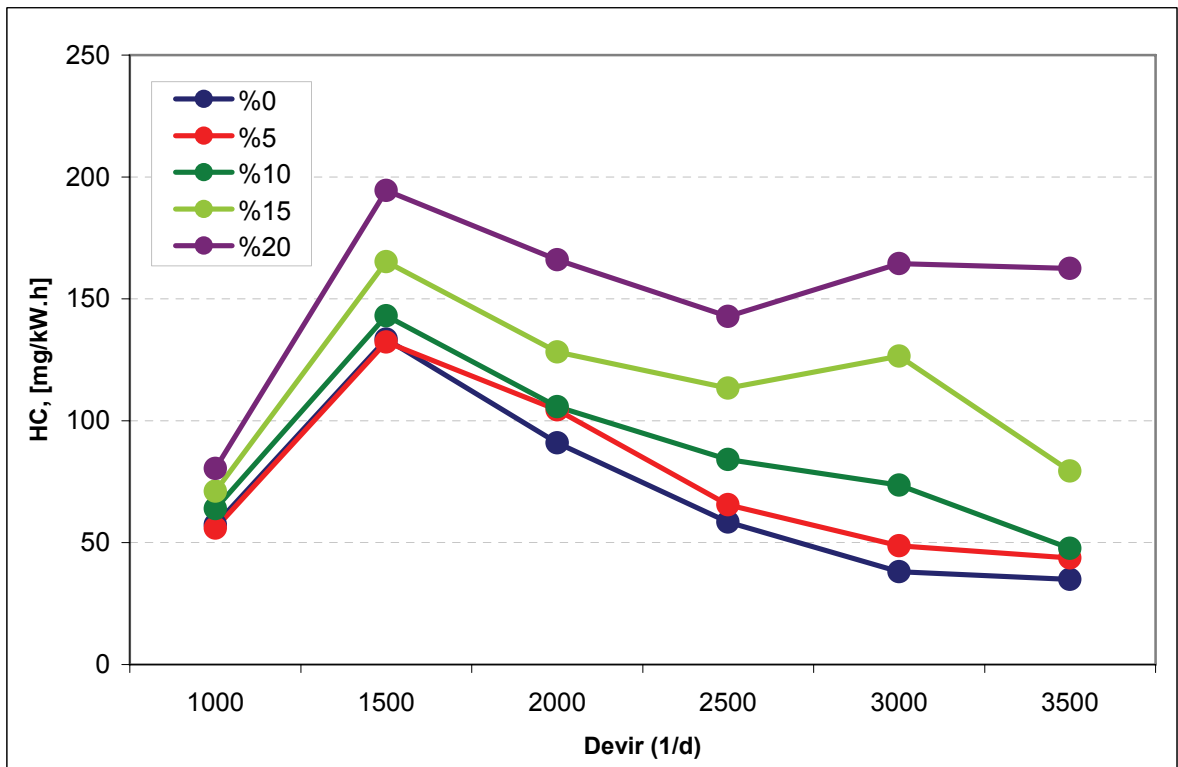


Şekil 7.83 Devirlere göre EGR oranlarının CO emisyonlarına etkisi (kanola)

CO emisyonları incelendiğinde %10 EGR oranının üstünde emisyonların özellikle kanola için çok fazla artış gösterdiği görülürken 2000 d/d ve daha düşük hızlarda bu durumun daha az etkili olduğu grafiklerden elde edilen bir başka sonuçtur. %10 EGR oranıyla karbonmonoksit emisyonları kanola için ortalama %64.21 artış gösterirken bu değer %15 EGR oranında %140,95 oranına yükselmektedir. Motorin için %10 EGR oranıyla ortalama %57.62 artış gözlenirken %15 EGR oranıyla %125.8 değerine yükselmiştir. CO emisyonları açısından limit EGR oranının %10 olduğu, bunun yanında kanola biyodizelinin motorine göre dezavantajlı olduğu da elde edilen neticelerdendir.

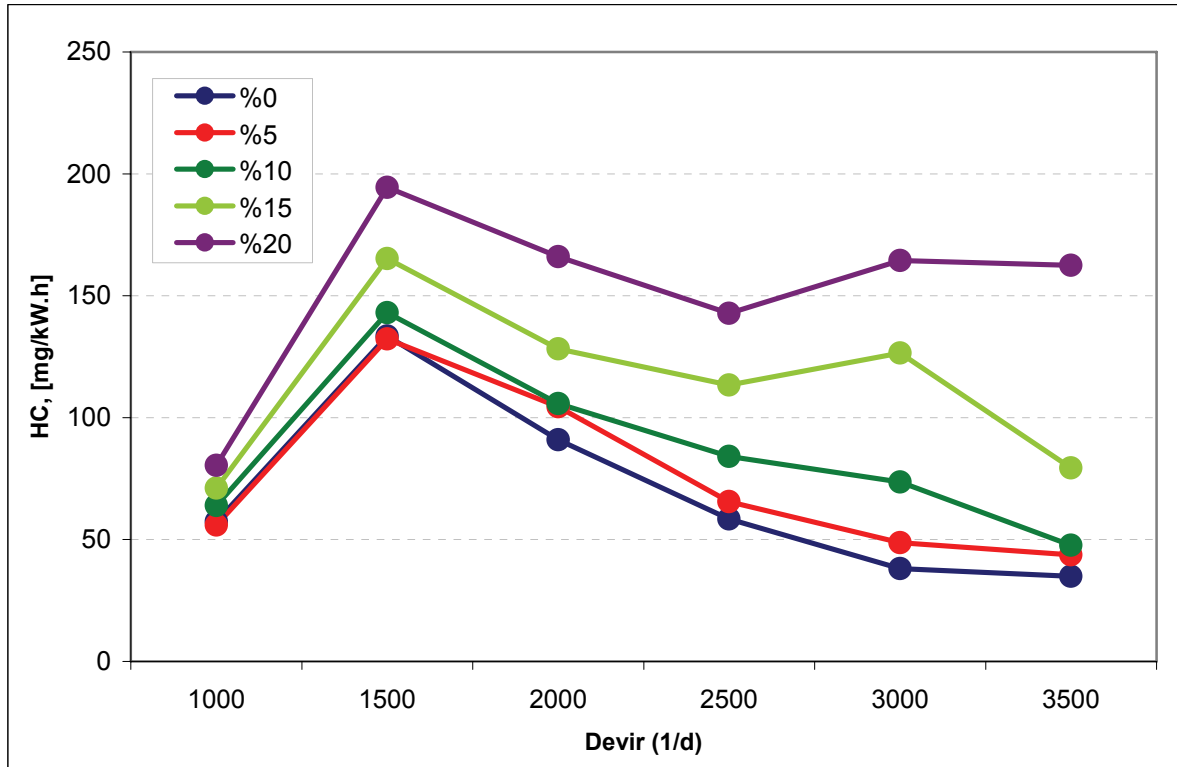


Şekil 7.84 Devirlere göre EGR oranlarının HC emisyonlarına etkisi (motorin)

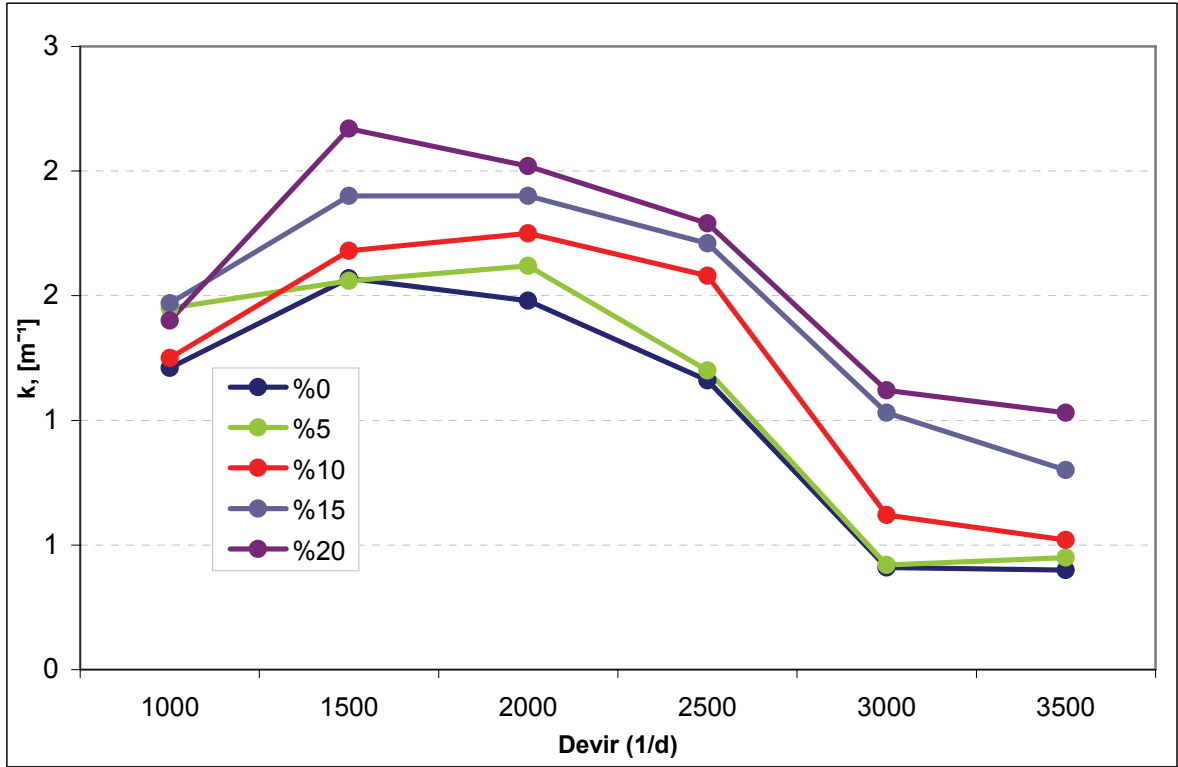


Şekil 7.85 Devirlere göre EGR oranlarının HC emisyonlarına etkisi (kanola)

HC emisyonları açısından kanola yakıtı kullanıldığında en yüksek emisyon değerleri bütün EGR oranları için 1500 d/d'da elde edilirken motorinde en yüksek emisyonlara 1500 ile 2000 d/d arasında ulaşılmıştır. Motorinin EGR oranlarının artışına çok fazla HC artışı göstermemesine rağmen kanolanın çok fazla artış göstermesi HC emisyonları açısından EGR kullanımını sınırlandıran bir etkidir. Motorin ile %20 EGR oranında ortalama özgül HC emisyonları artışı %76.28 olurken kanolada %20 EGR için bu değer %168.4, %15 EGR için %90.38 mertebesindedir. Kanola biyodizelinin HC emisyonları açısından bakıldığında EGR sisteminin %10 ilâ %15 oranları arasında sınırlandırılması gerektiği gözlenmiştir. Bu durum motorin için %20'ye kadar çıkarılabilir.

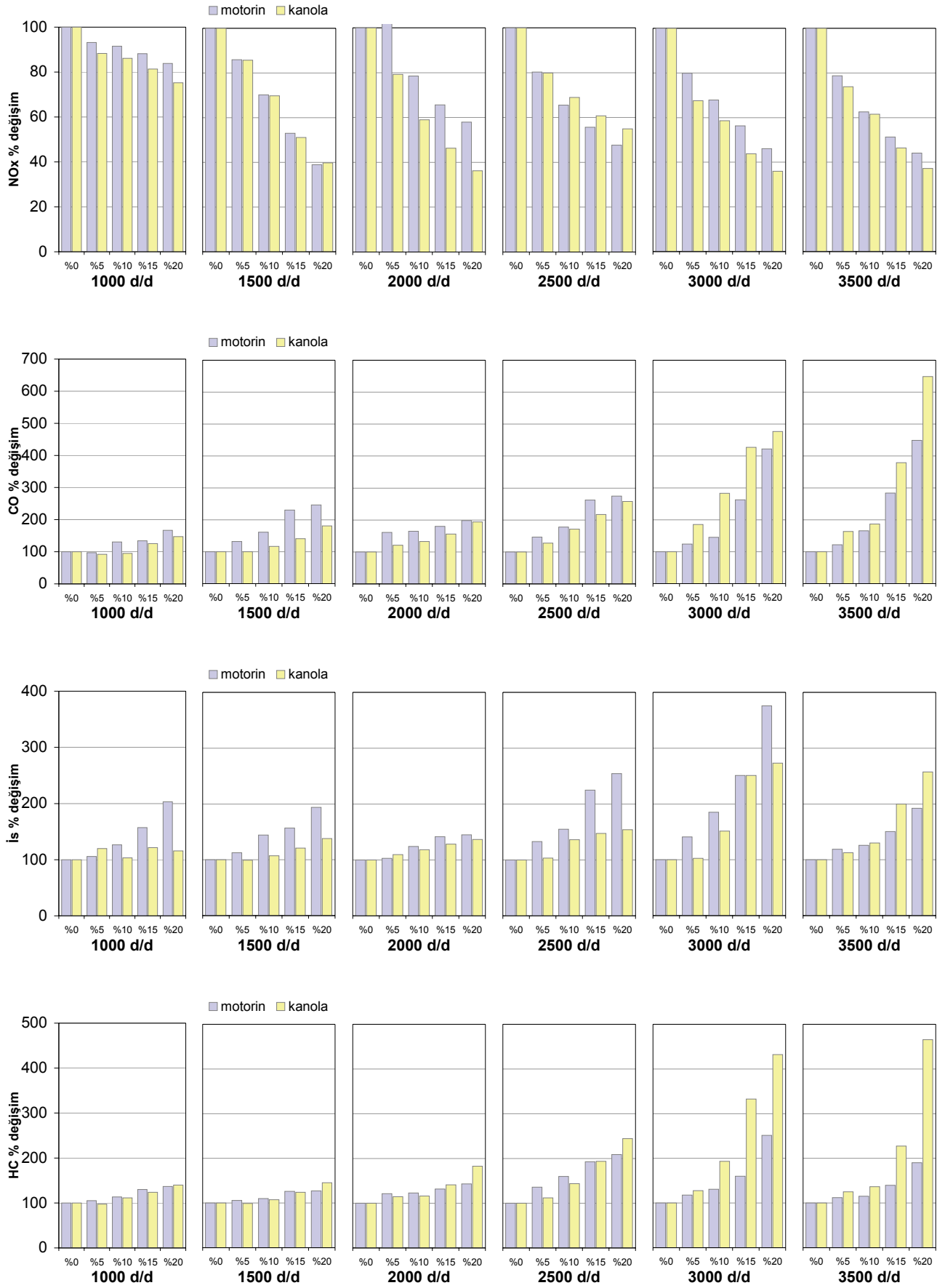


Şekil 7.86 Devirlere göre EGR oranlarının HC emisyonlarına etkisi (motorin)

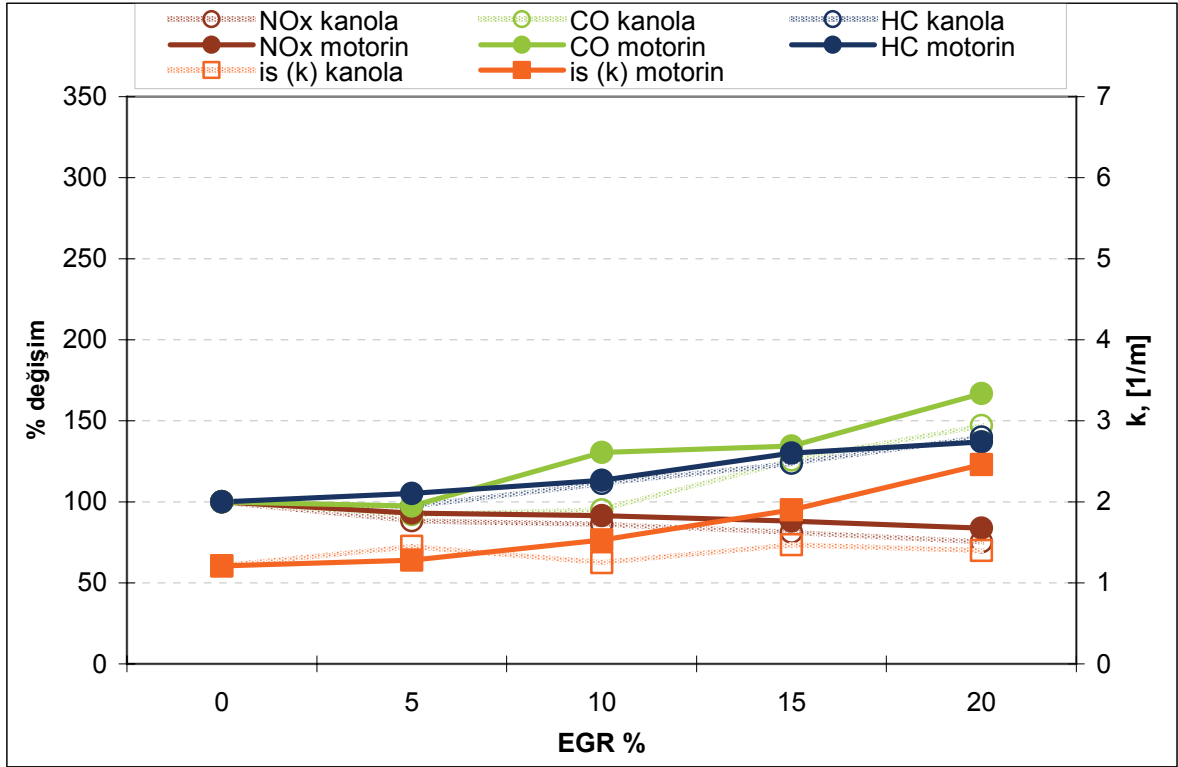


Şekil 7.87 Devirlere göre EGR oranlarının is emisyonlarına etkisi (kanola)

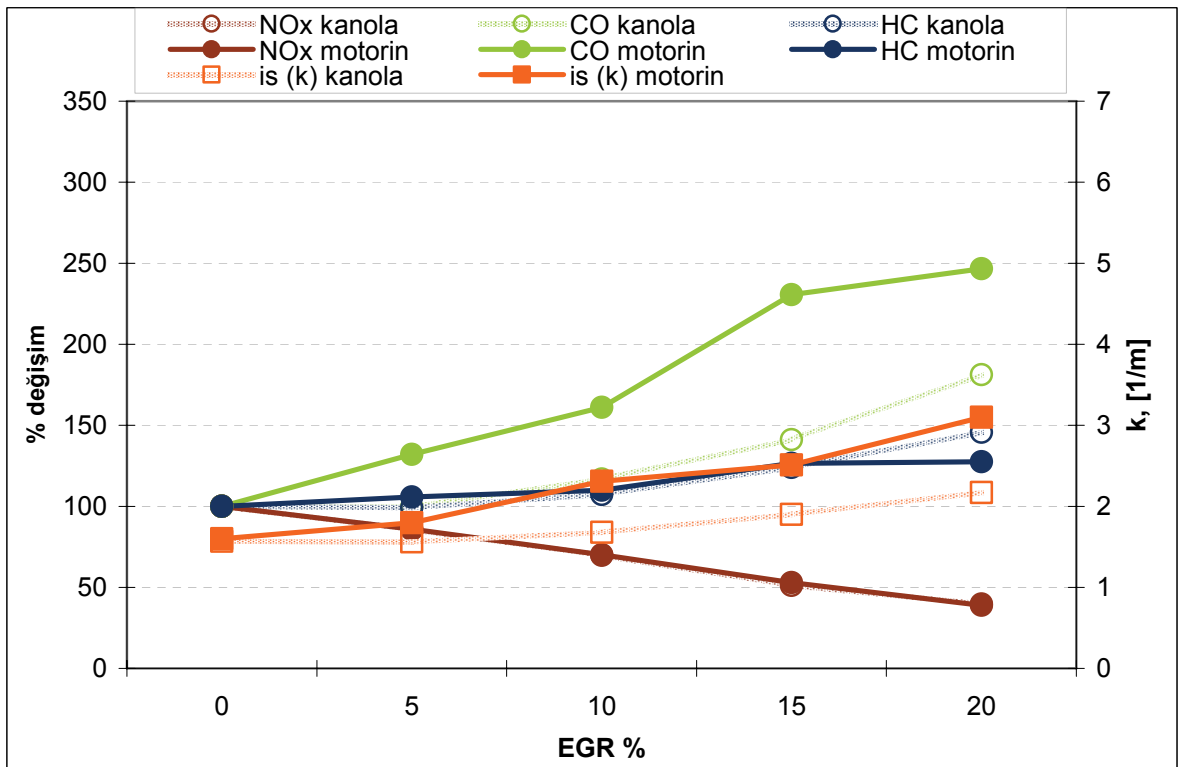
İs değerleri açısından bakıldığında motorinin maksimum isli çalıştığı devir %0, %5 ve %10 EGR oranında 1500 d/d iken %15 ve %20 EGR oranında maksimum moment devri olan 2500 d/d'ya kaymıştır. Kanolada ise tüm EGR oranları için 1500 ile 2000 d/d arasında meydana gelmektedir. Kanola biyodizeli kullanıldığında %20 EGR oranında k katsayısındaki ortalama artış %79.23 iken motorinin %15 EGR oranında bu değer %80.38'dir. Biyodizel motorine göre daha issiz çalışmanın yanında EGR yapıldığında çok daha az is artışına sebep olduğu için is açısından motorine göre çok daha fazla avantajlıdır.



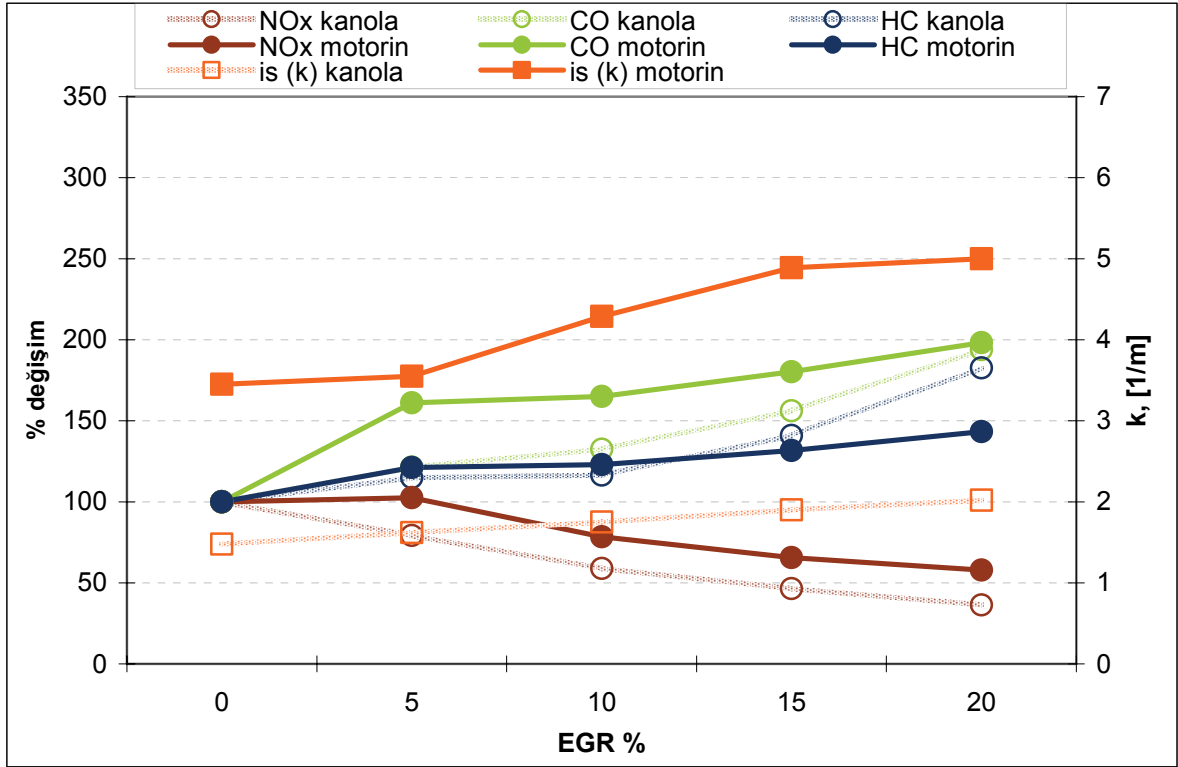
Şekil 7.88 Devirlere göre EGR oranlarının is ve emisyonlara etkisi



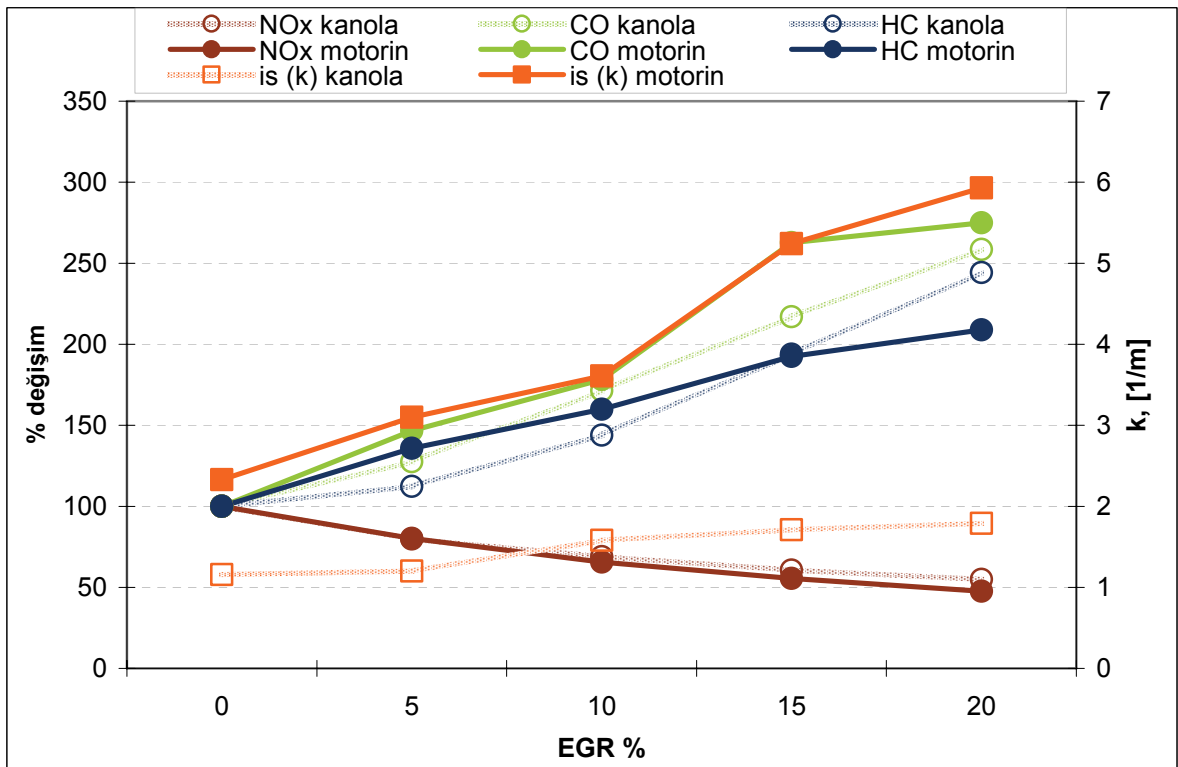
Şekil 7.89 İs ve emisyonların yüzde olarak değişimi (1000 d/d)



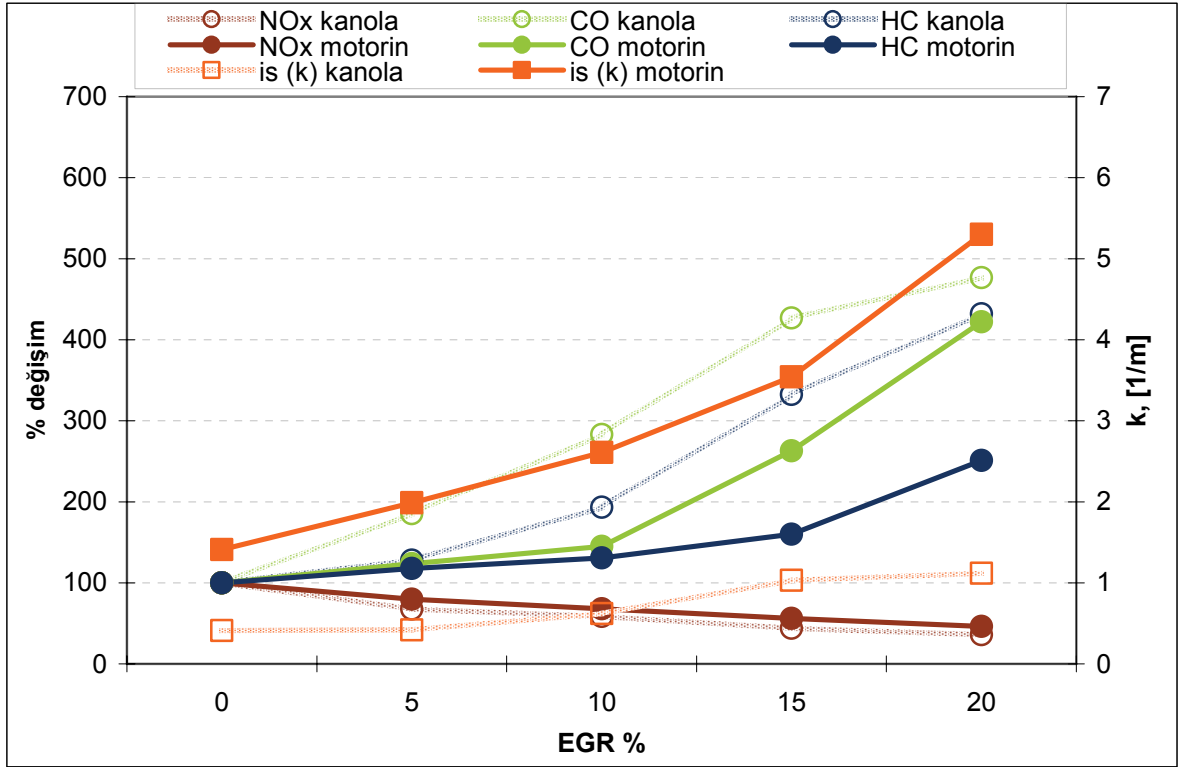
Şekil 7.90 İs ve emisyonların yüzde olarak değişimi (1500 d/d)



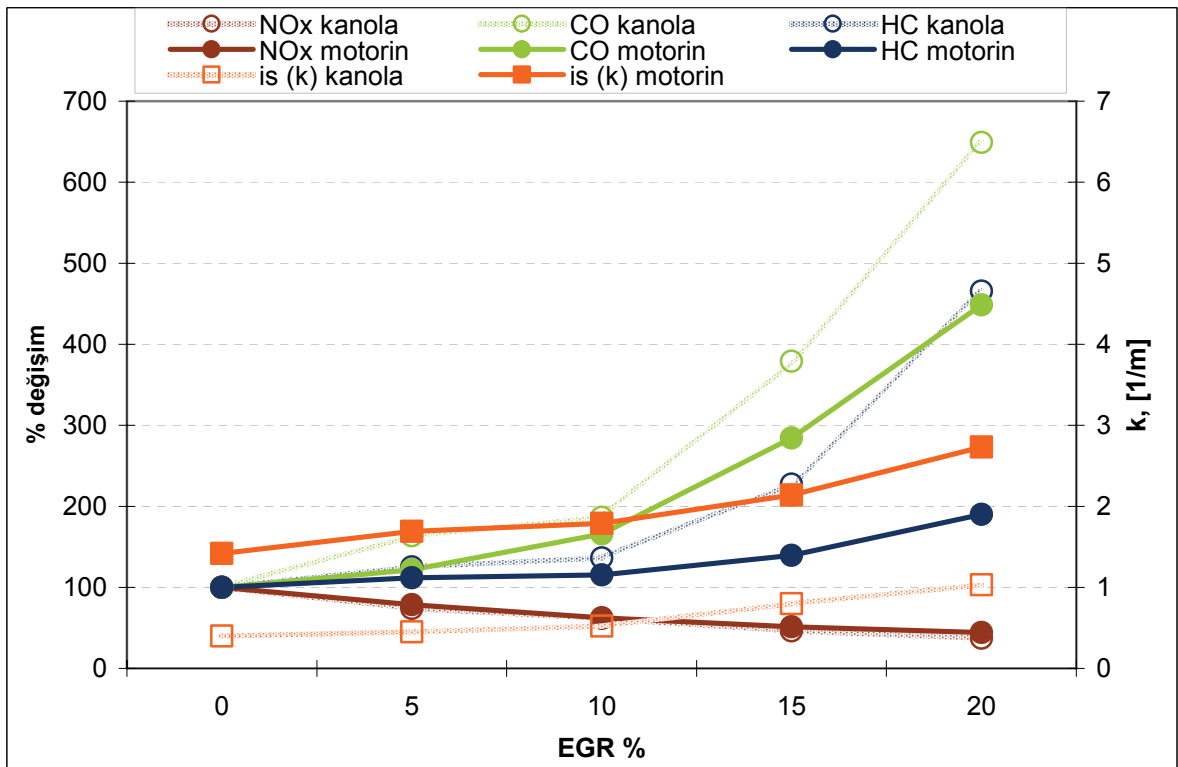
Şekil 7.91 İs ve emisyonların yüzde olarak değişimi (2000 d/d)



Şekil 7.92 İs ve emisyonların yüzde olarak değişimi (2500 d/d)

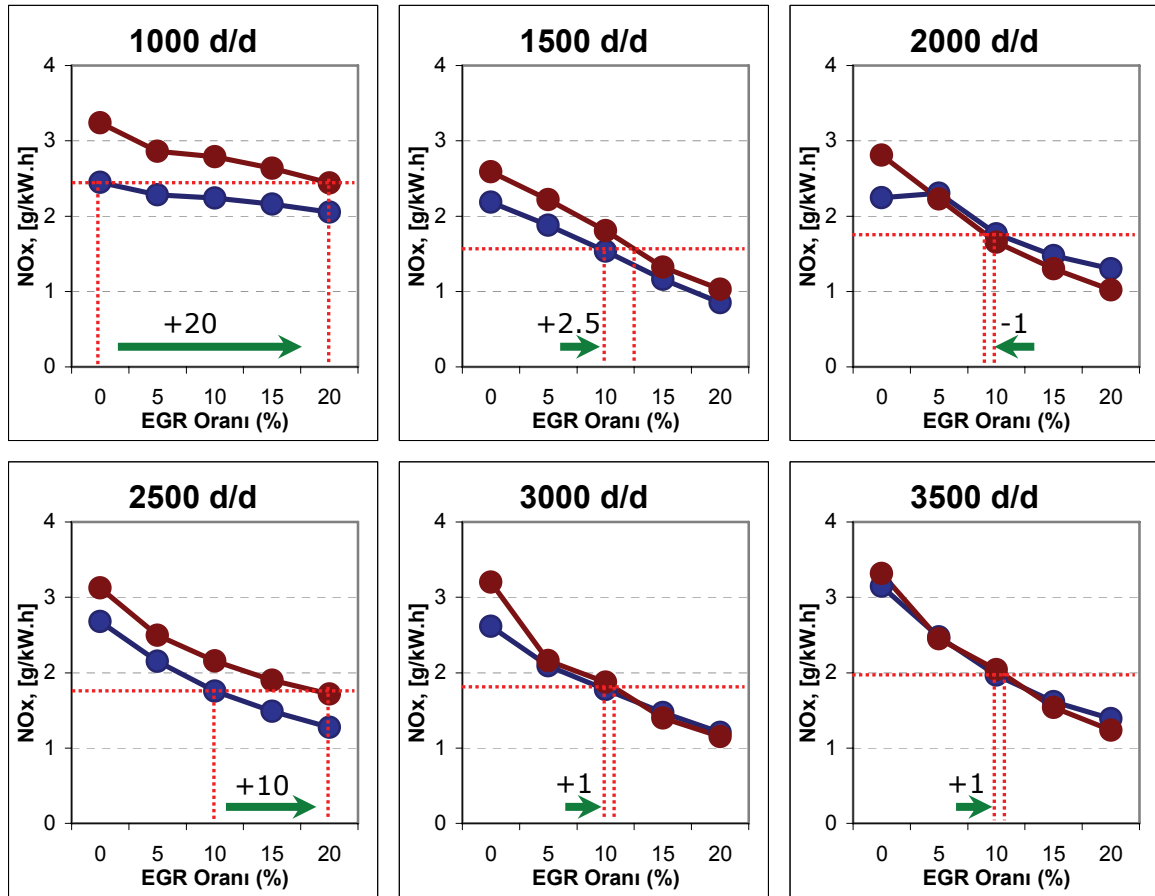


Şekil 7.93 İis ve emisyonların yüzde olarak değişimi (3000 d/d)



Şekil 7.94 İis ve emisyonların yüzde olarak değişimi (3500 d/d)

Maksimum moment devri (2500 d/d) ve maksimum güç devirlerinde (3500 d/d) emisyonların ve k katsayısının EGR oranlarına göre değişiminin topluca gösterildiği grafiklerden anlaşılacağı üzere %20 EGR oranında her iki yakıtın NOx harici parametrelerinde yüksek miktarda artış oluşmaktadır. %10 EGR oranında ise her iki yakıt için CO, HC ve is emisyonlarında bir miktar artış görülse de NOx emisyonları maksimum momentte %31.1, maksimum güçte ise %38.5 oranında düşürülebilmektedir.



Şekil 7.95 NOx emisyonlarının her iki yakıt için EGR oranı karşılaştırması

Özgül NOx emisyonları grafiklerinde motorin için yapılan %10 oranındaki EGR ile ulaşılan NOx emisyonunun biyodizel ile sağlanması için yapılması gereken EGR oranları gösterilmiştir. Buna göre 1000 d/d hızında motorin için %0 EGR şartında NOx emisyonlarını sağlayan kanola değeri %20'dir. 1500 d/d hızında motorinin %10 EGR oranına karşılık biyodizel için %12.5 EGR yapılması gereklidir. 2000 d/d'de motorinin %10 EGR oranına karşılık kanola için %9, 2500 d/d'de %10 EGR oranına karşılık %20 ve 3000 ile 3500 d/d hızlarında %10 EGR oranına karşılık %11 oranında EGR yapılması ile her iki yakıt için de eşit özgül NOx emisyonları salındığı görülmektedir.

## SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Motorin ile kanola yağından elde edilen biyodizelin EGR stratejilerinin karşılaştırılmasını konu edinen çalışmamızda her iki yakıt için test düzeneğinde yapılan deneylerde devir, moment, güç, egzoz gazlarındaki NO<sub>x</sub>, CO, HC, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> gazlarının hacimsel değerleri, egzoz gazının k absorplama katsayısı ve yakıt debisi parametreleri ölçülmüştür. Bu verilerle hazırlanan grafiklerin irdelenmesi sonucunda ortaya şu sonuçlar çıkmıştır.

Esas itibarıyla NO<sub>x</sub> emisyonlarını azaltma amacıyla uygulanan EGR beklendiği üzere her iki yakıtta da NO<sub>x</sub> emisyonlarını düşürmüştür. Kanola biyodizelinde %20 EGR uygulandığında emisyonlarda ortalama %53.42 düşüş kaydedilmiştir. Bu değer motorinde %46.88'dir. EGR uygulamasıyla kanola biyodizeli için aynı EGR oranında motorine göre daha fazla NO<sub>x</sub> emisyonu düşürülebilmektedir.

Motorin için yapılan %10 oranında EGR ile salınan özgül NO<sub>x</sub> emisyon değerlerine kanola için 1500 d/d için %2.5 artışla %12.5, 2000 d/d için %1 azalmayla %9, 2500 d/d için %10 artışla %20, 3000 d/d için %1 artışla %11 ve 3500 d/d için %1 artışla %11 EGR oranında ulaşabilmek mümkündür. Ayrıca 1000 d/d için motorinle EGR yapılmayan durumda kanola için %20 EGR ile aynı emisyon salım değerine ulaşmak mümkündür.

EGR'nin bir sonucu olarak azalan oksijen miktarının sebep olduğu CO emisyonları biyodizel için dezavantaj oluşturmaktadır. CO emisyonları açısından %10 EGR oranında %64.21 mertebesindeki ortalama emisyon artışı sınır olarak değerlendirilmiştir. Öte yandan HC emisyonları için de %10 EGR oranında kanola için %34.75, motorin için %25.33 değerindeki ortalama artış değerleri sınır EGR oranı olarak değerlendirilmiştir.

Kanola ile EGR uygulamasında is artışının motorinle kıyaslandığında çok düşük çıkması EGR oranında bu açıdan bir esneklik sağlanabileceğini göstermektedir. %20 EGR oranında kaydedilen ortalama %79.23'lük artışın yanında motorinin %127.44'lük artış, kanola biyodizeli kullanıldığında is açısından yüksek EGR oranlarına çıkılabilmemesine olanak sağlar.

Yakıt tüketimi açısından bakıldığında ise %5 oranında uygulanan EGR ile her iki yakıtta, bilhassa kanola biyodizelinde düşük hızlar için özgül yakıt tüketimi değerlerinin iyileştiği gözlenmiştir. Bunun yanında %10 EGR oranı ile kanola biyodizeli %1.5 mertebesinde özgül yakıt tüketiminde artışa sebebiyet vermektedir. Bu değer motorin için %3.48'dir.

Güç açısından EGR uygulamasına bakıldığında aynı EGR oranında kanola biyodizelinin motorine göre daha az güç kayıplarına sebep olduğu ortaya çıkmıştır. %10 EGR oranında

ortalama %2.88 mertebesinde güç kaybı gösteren kanola biyodizeli, %3.77'lik kayıpla motorinden bu açıdan üstündür.

Çalışmamızda motorun püskürtme sisteminde ve pompanın avans ayarlarında herhangi bir değişikliğe gidilmemiştir. Tamamen motorinin yakıt karakteristiğine göre optimize edilmiş bir yakıt püskürtme sisteminden kanola biyodizeli için optimum değerleri sağlaması elbette beklenemez. Bu sebepten ötürü değişen setan sayısı ve viskozite gibi tutuşma gecikmesini etkileyen pek çok faktörü de göz önünde tutarak; bu çalışmanın pompanın püskürtme avansını da hesaba katarak geliştirilmesi mümkündür.

**KAYNAKLAR**

- Abd-Alla G.H., (2002), "Using exhaust gas recirculation in internal combustion engines: A review, *Energy Conversion & Management*", 43:1027–1042
- Agarwal A.K., Singh S.K., Sinha S., Shukla M.K., (2004), "Effect of EGR on the exhaust gas temperature and exhaust opacity in compression ignition engines, *Sadhana*", 29:275–284
- Agarwal D., Sinha S., Agarwal A.K., (2006), "Experimental investigation of control of NO<sub>x</sub> emissions in biodiesel-fueled compression ignition engine, *Renewable Energy*", 31:2356–2369
- Agarwal A.K., (2007), "Biofuels (alcohols and biodiesel) applications as fuels for internal combustion engines, *Progress in Energy and Combustion*", 33:233–271
- Anonim, (2005), "Service Contract to Carry Out Economic Analysis and Business Impact Assessment of CO<sub>2</sub> Emissions Reduction Measures in the Automotive Sector, Final Report", 3–4
- Balcı B., (2005), "Diesel motor yakıt olarak kullanılan atık bitkisel yağ esterlerinin maksimum basınç ve tutuşma gecikmesi açısından motorin ile karşılaştırılması", Yüksek Lisans Tezi, YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü
- Banapurmatha N.R., Tewaria P.G., Hosmath R.S., (2008), "Performance and emission characteristics of a DI compression ignition engine operated on Honge, Jatropa and sesame oil methyl esters, *Renewable Energy*", 33:1982–1988
- Challen B., Baranescu R., (1999), "Diesel Engine Reference Book", Butterworth-Heinemann
- Çanakçı M., Şanlı H., (2005), "Dizel Motorlar İçin Yükselen Bir Alternatif: Biyodizel, III. Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu", 1–6
- Çanakçı M., Alptekin E., (2006), "Biyodizel ve Türkiye'deki Durumu, *Mühendis ve Makine Dergisi*", 561:57–64
- Çanakçı M., (2007), "Combustion characteristics of a turbocharged DI compression ignition engine fueled with petroleum diesel fuels and biodiesel, *Bioresource Technology*", 98:1167–1175
- Haşimoğlu C., İçingür Y., Öğüt H., (2002), "Dizel Motorlarında Egzoz Gazları Resirkülasyonunun (EGR) Motor Performansı ve Egzoz Emisyonlarına Etkisinin Deneysel Analizi, *Turkish Journal of Engineering & Environmental Sciences*", 26:127–135
- He Y., Bao Y.D., (2003), "Study on rapeseed oil as alternative fuel for a single-cylinder diesel engine, *Renewable Energy*", 28:1447–1453
- Heywood J.B., (1989), "Internal Combustion Engines Fundamentals", McGraw Hill
- Hountalas D.T., Mavropoulos G.C., Binder K.B., (2008), "Effect of exhaust gas recirculation (EGR) temperature for various EGR rates on heavy duty DI diesel engine performance and emissions, *Energy*", 33:272–283
- Kegl B., (2006), "Experimental Investigation of Optimal Timing of the Diesel Engine Injection Pump Using Biodiesel Fuel, *Energy & Fuels*", 20:1460–1470
- Kegl B., (2008), "Effects of biodiesel on emissions of a bus diesel engine, *Bioresource Technology*", 99:863–873

- Knothe G., Van Gerpen J., Krahl J., (2005), "The Biodiesel Handbook", AOCS Press, Illinois
- Knothe G., Sharp C.A., Ryan T.W., (2006), "Exhaust Emissions of Biodiesel, Petrodiesel, Neat Methyl Esters, and Alkanes in a New Technology Engine, *Energy & Fuels*", 20:403–408
- Labeckas G., Slavinskas S., (2006), "The effect of rapeseed oil methyl ester on direct injection Diesel engine performance and exhaust emissions, *Energy Conversion & Management*", 47:1954–1967
- Lee C.S., Park S.W., Kwon S.I., (2005), "An Experimental Study on the Atomization and Combustion Characteristics of Biodiesel-Blended Fuels, *Energy & Fuels*", 19:2201–2208
- Leung D.Y.C., Luo Y., Chan T.L., (2006), "Optimization of Exhaust Emissions of a Diesel Engine Fuelled with Biodiesel, *Energy & Fuels*", 20:1015–1023
- Maiboom A., Tauzia X., Hétet J.F., (2008), "Experimental study of various effects of exhaust gas recirculation (EGR) on combustion and emissions of an automotive direct injection diesel engine, *Energy*", 33:22–34
- Marques A., Monteiro E., Moreira N.A., Malheiro S., (2007), "NO<sub>x</sub> Emissions Reduction in a Biodiesel Engine by Means of EGR Technology, SAE Technical Paper Series", 2007-01-0078
- Merker P.G., Schwarz C., Stiesch G., Otto F., (2006), "Simulating Combustion", Springer, Heidelberg
- Murugesan, A., Umarani C., Subramanian R., Nedunchezianet N., (2008), "Bio-diesel as an alternative fuel for diesel engines - A review, *Renew Sustain Energy Reviews*", doi:10.1016/j.rser.2007.10.007
- Ölçüm T., (2006), "Biyodizel Teknolojisi", Yüksek Lisans Tezi, YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü
- Özkan M., (2007), "Comparative Study of the Effect of Biodiesel and Diesel Fuel on a Compression Ignition Engine's Performance, Emissions, and Its Cycle by Cycle Variations, *Energy & Fuels*", 21:3627–3636
- Peng H., Cui Y., Shi C., Deng K., (2008), "Effects of exhaust gas recirculation (EGR) on combustion and emissions during cold start of direct injection (DI) diesel engine, *Energy*", 33:471–479
- Peterson C.L., Hustrulid T., (1997), "Carbon Cycle For Rapeseed Oil Biodiesel Fuels, Biomass and Bioenergy", 14-2:91–101
- Pradeep V., Sharma R.P., (2007), "Use of HOT EGR for NO<sub>x</sub> control in a compression ignition engine fuelled with bio-diesel from Jatropha oil, *Renewable Energy*", 32:1136–1154
- Rakopoulos C.D., Antonopoulos K.A., Rakopoulos D.C., Hountalas D.T., Giakoumis E.G., (2006), "Comparative performance and emissions study of a direct injection Diesel engine using blends of Diesel fuel with vegetable oils or bio-diesels of various origins, *Energy Conversion & Management*", 47:3272–3287
- Sendzikiene E., Makareviciene V., Janulis P., (2006), "Influence of fuel oxygen content on diesel engine exhaust emissions, *Renewable Energy*", 31:2505–2512
- Tsolakis A., (2006), "Effects on Particle Size Distribution from the Diesel Engine Operating on RME-Biodiesel with EGR, *Energy & Fuels*", 20:1418–1424

Tsolakis A., Megaritis A., Wyszynski M.L., Theinnoi K., (2007), “Engine performance and emissions of a diesel engine operating on diesel-RME (rapeseed methyl ester) blends with EGR (exhaust gas recirculation), Energy”, 32:2072–2080

Ulusoy Y., Alibaş K., (2002), “Diesel Motorlarda Biodiesel Kullanımının Teknik ve Ekonomik Olarak İncelenmesi, Uludağ Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi”, 16:37–50

Yang F., Minggao O., (2003), “Experimental Research on EGR in a Diesel Engine Equipped with Common Rail Injection System, SAE Technical Paper Series”, 2003-01-0351

Yoshimoto Y., Tamaki H., (2001), “Reduction of NOx and Smoke Emissions in a Diesel Engine Fueled by Biodiesel Emulsion Combined with EGR, SAE Technical Paper Series”, 2001-01-0649

Yücesu H.S., Altın R., Çetinkaya S., (2001), “Dizel Motorlarında Alternatif Yakıt Olarak Bitkisel Yağ Kullanımının Deneysel İncelenmesi, Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences”, 25:39–49

Zheng M., Reader G.T., Hawley J.G., (2004), “Diesel Engine Exhaust Gas Resirculation – A Review on Advanced and Novel Concept, Energy Conversion & Management”, 45:883-900

## **İNTERNET KAYNAKLARI**

[1] U.S. Energy Information Administration

([http://tonto.eia.doe.gov/dnav/pet/hist/rcrr01nus\\_1a.htm](http://tonto.eia.doe.gov/dnav/pet/hist/rcrr01nus_1a.htm))

[2] U.S. Energy Information Administration

(<http://tonto.eia.doe.gov/dnav/pet/hist/wtotworldw.htm>)

**ÖZGEÇMİŞ**

Doğum tarihi	29.1.1981	
Doğum yeri	Avusturya	
Lise	1992-1999	Sakarya Anadolu Lisesi
Lisans	1999-2005	Yıldız Üniversitesi Makine Fak. Makine Mühendisliği Bölümü
Yüksek Lisans	2005-2008	Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Müh. Anabilim Dalı, Enerji Programı