

168655

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**DÜŞÜK ISI KAYIPLI BİR DİZEL MOTORUNDA
BİYODİZEL KULLANIMININ PERFORMANS VE
EMİSYON PARAMETRELERİNE ETKİSİ**

DOKTORA TEZİ

Can HAŞİMOĞLU

Enstitü Anabilim Dalı : MAKİNA EĞİTİMİ
Tez Danışmanı : Prof. Dr. İbrahim ÖZSERT

Ekim 2005

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ


**DÜŞÜK ISI KAYIPLI BİR DİZEL MOTORUNDA
BİYODİZEL KULLANIMININ PERFORMANS VE
EMİSYON PARAMETRELERİNE ETKİSİ**


DOKTORA TEZİ

Can HAŞİMOĞLU


Enstitü Anabilim Dalı : MAKİNA EĞİTİMİ


Bu tez 14.10.2005 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından
Oybirliği/Oyçokluğu ile kabul edilmiştir.


Prof. Dr. İbrahim ÖZSERT
Jüri Başkanı


Prof. Dr. Bedri YÜKSEL
Jüri Üyesi


Doç. Dr. H. Serdar YÜCESU
Jüri Üyesi


Doç. Dr. Adnan PARLAK
Jüri Üyesi


Yrd. Doç. Dr. Halit YAŞAR
Jüri Üyesi

ÖNSÖZ

Dizel motorlu taşıt sayısının artması ve fosil yakıt kaynaklarının hızla tükenmesi bitkisel yağlar gibi alternatif yakıt araştırmalarının önemini artırmaktadır. Düşük ısı kayıplı motor kavramı bitkisel yağların dizel motorlarına adaptasyonunda, fosil kökenli dizel yakıtına alternatif oluşturabileceği için önemlidir. Bu çalışmada düşük ısı kayıplı, aşırı doldurmalı ve direkt püskürtmeli bir dizel motorunda yakıt olarak biyodizel kullanımının motor performansı ve egzoz emisyon parametrelerine olan etkileri deneysel olarak incelenmiştir.

Çalışmalarım sırasında büyük desteklerini gördüğüm danışmanlarım Sn. Prof. Dr. İbrahim ÖZSERT ve Sn. Yrd. Doç. Dr. Yakup İÇİNGÜR'e, katkı ve yorumlarından ötürü Sn. Doç. Dr. Adnan PARLAK'a, deneysel çalışmalardaki yardımlarından ötürü Sn. Prof. Dr. M. Sahir SALMAN'a, Sn. Arş. Gör. Murat CİNİVİZ'e, Sn. Tek. Öğr. Ahmet MURCAK'a, Sn. Tek. Öğr. H. Mustafa YILDIRIM'a, çalışmaya desteklerinden ötürü Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi yetkililerine, Varkut Motor Yenileştirme Atelyesine, Senkron Metal ve Seramik Kaplama Tic. A.Ş.'ye, ODTÜ Petrol Araştırma Merkezi ve TÜPRAŞ yetkililerine teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarım boyunca bana vermiş oldukları destek ve göstermiş oldukları sabır için eşime, anneme, babama ve kardeşime içten teşekkürlerimi sunarım.

Sakarya, 2005

Can HAŞİMOĞLU

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ	ii
İÇİNDEKİLER	iii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ	vii
ŞEKİLLER LİSTESİ	x
TABLolar LİSTESİ	xiii
ÖZET	xiv
SUMMARY	xv
BÖLÜM 1.	
GİRİŞ	1
BÖLÜM 2.	
BİYODİZEL	5
2.1. Dizel Yakıtlarının Genel Özellikleri	5
2.1.1. Setan sayısı	6
2.1.2. Viskozite	6
2.1.3. Isıl değer	7
2.1.4. Özgül ağırlık	7
2.1.5. Duman ve akma noktası	8
2.1.6. Parlama ve alevlenme noktası	8
2.1.7. Uçuculuk	9
2.1.8. Kükürt ve kül	9
2.2. Dizel Yakıtından İstenilen Özellikler	9
2.3. Hidrokarbon Esaslı Dizel Yakıtlarının Kimyasal Yapısı	10
2.3.1. Parafinler (Alkanlar)	11
2.3.2. Naftenler (Sikloparafinler)	13
2.3.3. Olefinler (Alkenler)	14

2.3.4. Alkinler (Asetilenler)	14
2.3.5. Aromatikler (Benzen türevleri)	15
2.4. Bitkisel Yağlar	16
2.4.1. Doymuş yağ asitleri	17
2.4.2. Doymamış yağ asitleri	17
2.4.3. Gliserin	18
2.4.4. Ayçiçek yağı	18
2.5. Bitkisel Yağların Yakıt Özellikleri	19
2.6. Dizel Yakıtı Olarak Bitkisel Yağların Performansı	20
2.7. Biyodizel ve Üretim Yöntemleri	21
2.7.1. Seyreltme	21
2.7.2. Piroliz	22
2.7.3. Mikroemülsiyon	22
2.7.4. Transesterifikasyon	23
2.8. Biyodizelin Özellikleri ve Standartları	
2.9. Dizel Yakıtı Olarak Biyodizelin Performansı ve Yanma Denklemi	26
2.10. Kaynak Araştırması	28

BÖLÜM 3.

DÜŞÜK ISI KAYIPLI MOTORLAR	34
3.1. Adyabatik Motor	35
3.2. İleri Teknoloji Seramikleri	36
3.2.1. Zirkonya (ZrO_2)	37
3.2.2. Yitriya (Y_2O_3)	39
3.2.3. Magnezya (MgO)	39
3.2.4. Alümina (Al_2O_3)	40
3.2.5. Berilya	40
3.3. İçten Yanmalı Motorlarda Termal Bariyer Kaplama Uygulamaları	40
3.3.1. Alev sprej kaplama	41
3.3.1.1. Alevle toz sprej kaplama	42
3.3.1.2. Alevle tel sprej kaplama	42

3.3.2. Atmosferik plazma sprej kaplama	43
3.4. Düşük Isı Kayıplı Dizel Motorlarında Yanma	47
3.5. Kaynak Araştırması	51

BÖLÜM 4.

DENEYSEL ÇALIŞMALAR	58
4.1. Materyal	58
4.1.1. Biyodizel üretimi	58
4.1.2. Biyodizel özellikleri	60
4.1.3. Deney motoru	61
4.1.4. Motor parçalarının termal bariyer amaçlı kaplanması	62
4.1.5. Deney düzeneği	64
4.1.5.1. Dinamometre	64
4.1.5.2. Hava debi ölçer	66
4.1.5.3. Hassas terazi	66
4.1.5.4. Egzoz emisyon ölçüm cihazları	67
4.1.5.5. Sıcaklık göstergesi	68
4.1.5.6. Kronometre	68
4.2. Yöntem	68
4.3. Hesaplama Yöntemleri	69
4.3.1. Efektif güç	69
4.3.2. Özgül yakıt tüketimi	70
4.3.3. Hacimsel verim	70
4.3.4. Karışımın ısıl değeri	71
4.3.5. Efektif verim	71

BÖLÜM 5.

ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA	72
5.1. Tam Yük Değişik Devir Deneyleri	72
5.1.1. Efektif güç	72
5.1.2. Döndürme momenti	73
5.1.3. Özgül yakıt tüketimi	76
5.1.4. Egzoz gazı sıcaklığı	77

5.1.5. Hacimsel verim	79
5.1.6. Karışımın ısı değeri	80
5.1.7. Efektif verim	81
5.1.8. Hava fazlalık katsayısı	82
5.1.9. Azot oksit emisyonu	83
5.1.10. Duman koyuluğu	85
5.1.11. CO ₂ emisyonu	87
5.2. Sabit Devir Değişik Yük Deneyleri	88
5.2.1. Özgöl yakıt tüketimi	89
5.2.2. Egzoz gazı sıcaklığı	92
5.2.3. Efektif verim	95
5.2.4. Hava fazlalık katsayısı	97
5.2.5. Azot oksit emisyonu	99
5.2.6. Duman koyuluğu	101
5.2.7. CO ₂ emisyonu	103
BÖLÜM 6.	
SONUÇLAR VE ÖNERİLER	105
KAYNAKLAR	111
EKLER	121
ÖZGEÇMİŞ	124

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

Al	: Alüminyum
Al ₂ O ₃	: Dialüminyum trioksit
Be	: Berilyum
BeO	: Berilyum oksit
C	: Karbon
Ca	: Kalsiyum
CaO	: Kalsiyum oksit
CO	: Karbonmonoksit
CO ₂	: Karbondioksit
Cr	: Krom
cSt	: Centistokes
E	: Elastisite modülü
H	: Hidrojen
HC	: Hidrokarbon
Hu	: Alt ısı değer (kj/kg)
H ₂ SO ₄	: Sülfürik asit
G	: Giga
k	: Kübik
K	: Isı iletim katsayısı (W/mK)
K _c	: Kırılma tokluğu (MPa m ^{1/2})
KOH	: Potasyum hidroksit
m	: Monoklinik
Mg	: Magnezyum
MgO	: Magnezya
NaOH	: Sodyum hidroksit
Ni	: Nikel
NO _x	: Azot oksit

O ₂	: Oksijen
PM	: Partikül madde
R _a	: Yüzey pürüzlülük değeri
Si	: Silisyum
SO ₂	: Kükürt dioksit
SO _x	: Kükürt oksit
t	: Tetragonal
Y	: Yitriyum
Y ₂ O ₃	: Yitriya
Y ₂ O ₃ ZrO ₂	: Yitriyum stabilize zirkonya
ZrO ₂	: Zirkonya
API	: American Petroleum Institute
ASTM	: American Society for Testing Materials
BYME	: Bitkisel Yağ Metil Esteri
CNG	: Compressed Natural Gas
DI	: Direct Injection (Direkt enjeksiyon)
DIK	: Düşük Isı Kayıplı
HV	: Vicker' Hardeness
kg	: Kilogram
K	: Kelvin
KMA	: Krank Mili Açısı
KSZ	: Kısmi Stabilize Zirkonya
l	: Litre
LNG	: Liquid Petroleum Gas
LPG	: Liquified Petroleum Gas
m	: Metre
M	: Mega
mg	: Miligram
mm	: Milimetre
Nm	: Newton metre
nm	: Nano metre
OPEC	: Organization of the Petroleum Exporting Countries

ÖA	: Özgöl Ağırık
ÖYT	: Özgöl Yakıt Tüketimi
Pa	: Paskal
ppm	: Parts per million
s	: Saniye
STD	: Standart
TBK	: Termal Bariyer Kaplama
ÜÖN	: Üst Ölü Nokta
YAME	: Yağ Asidi Metil Esteri
YAMAE	: Yağ Asidi Mono Alkali Esteri



ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1.	HC'ların genel sınıflandırılması	11
Şekil 2.2.	İlk dört alkanın yapıları, açık ve kapalı gösterimleri	12
Şekil 2.3.	Bazı izo-parafinlerin yapısı	13
Şekil 2.4.	İlk dört siklo alkanın yapısı ve basitleştirilmiş şekilleri	13
Şekil 2.5.	Hegzen ve bütadien'in açık gösterimi	14
Şekil 2.6.	1-bütün ve 2-bütün'in açık gösterimi	15
Şekil 2.7.	Benzen ve etil benzen'in açık gösterimi	15
Şekil 2.8.	Yağ asitlerinin gliserinle esterleşmesi	16
Şekil 2.9.	Basit ve karışık trigliserid	17
Şekil 2.10.	Bitkisel yağın metanol ile transesterifikasyonu	23
Şekil 3.1.	Düşük ısı kayıplı bir motorun yalıtılmış parçaları	36
Şekil 3.2.	Kübik, tetragonal ve monoklinik zirkonya	38
Şekil 3.3.	Seramik kaplama ve bağlayıcı katman	42
Şekil 3.4.	Atmosferik plazma sprey sistemi	44
Şekil 3.5.	Plazma sprey püskürtme tabancası	44
Şekil 3.6.	Plazma sprey kaplama teknolojisi; bileşenler ve parametreler	47
Şekil 3.7.	Dizel motorunda yanma safhaları	48
Şekil 3.8.	DIK ve STD dizel motorlarında silindir içi gaz sıcaklıklarının değişimi	50
Şekil 3.9.	DIK ve STD dizel motorlarında ısı açığa çıkış hızı değişimleri	51
Şekil 4.1.	Biyodizel üretim aşamaları	58
Şekil 4.2.	Esterleştirme reaksiyonu	60
Şekil 4.3.	Deney motoru	62
Şekil 4.4.	Seramik kaplanmış parçaların motor testlerinden önceki durumu ..	63
Şekil 4.5.	Seramik kaplanmış parçaların motor testlerinden sonraki durumu .	63
Şekil 4.6.	Deney düzeneğinin şematik görünümü	64
Şekil 4.7.	Hidrolik motor dinamometresi	65

Şekil 4.8.	Kuvvet ölçüm sisteminin şematik gösterimi	65
Şekil 4.9.	Hava debi ölçer	66
Şekil 4.10.	Hassas terazi	66
Şekil 4.11.	Egzoz emisyon ölçüm cihazı (GACO-SN)	67
Şekil 4.12.	Duman ölçüm cihazı (VLT 2600S)	67
Şekil 4.13.	Sıcaklık göstergesi (ELİMKO)	68
Şekil 5.1.	Motor devrine bağlı olarak efektif motor gücü değişimleri	73
Şekil 5.2.	Motor devrine bağlı olarak döndürme momenti değişimleri	74
Şekil 5.3.	Motor devrine bağlı olarak özgül yakıt tüketimi değişimleri	77
Şekil 5.4.	Motor devrine bağlı olarak egzoz gazı sıcaklıkları değişimleri	78
Şekil 5.5.	Motor devrine bağlı olarak hacimsel verim değişimleri	80
Şekil 5.6.	Motor devrine bağlı olarak karışımın ısı değeri değişimleri	81
Şekil 5.7.	Motor devrine bağlı olarak efektif verim değişimleri	81
Şekil 5.8.	Motor devrine bağlı olarak HFK değişimleri	83
Şekil 5.9.	Motor devrine bağlı olarak NO _x emisyonu değişimleri	84
Şekil 5.10.	Motor devrine bağlı olarak duman koyuluğu değişimleri	86
Şekil 5.11.	Motor devrine bağlı olarak CO ₂ emisyonu değişimleri	87
Şekil 5.12.	Deney motorunun çalışma bölgeleri	89
Şekil 5.13.	STD biyodizel eş özgül yakıt tüketimi eğrilerinin STD motorin ile karşılaştırılması	90
Şekil 5.14.	DIK biyodizel eş özgül yakıt tüketimi eğrilerinin STD motorin ile karşılaştırılması	91
Şekil 5.15.	DIK motorin eş özgül yakıt tüketimi eğrilerinin STD motorin ile karşılaştırılması	92
Şekil 5.16.	STD biyodizel eş egzoz gazı sıcaklığı eğrilerinin STD motorin ile karşılaştırılması	93
Şekil 5.17.	DIK biyodizel eş egzoz gazı sıcaklığı eğrilerinin STD motorin ile karşılaştırılması	93
Şekil 5.18.	DIK motorin eş egzoz gazı sıcaklığı eğrilerinin STD motorin ile karşılaştırılması	94
Şekil 5.19.	STD biyodizel eş efektif verim eğrilerinin STD motorin ile karşılaştırılması	96

Şekil 5.20. DIK biyodizel eş efektif verim eğrilerinin STD motorin ile karşılaştırılması	96
Şekil 5.21. DIK motorin eş efektif verim eğrilerinin STD motorin ile karşılaştırılması	97
Şekil 5.22. Döndürme momentine bağlı olarak HFK değişimleri (1400 devir/dakika)	98
Şekil 5.23. Döndürme momentine bağlı olarak HFK değişimleri (2800 devir/dakika)	99
Şekil 5.24. Döndürme momentine bağlı olarak NO _x emisyonu değişimleri (1400 devir/dakika)	100
Şekil 5.25. Döndürme momentine bağlı olarak NO _x emisyonu değişimleri (2800 devir/dakika)	100
Şekil 5.26. Döndürme momentine bağlı olarak duman koyuluğu değişimleri (1400 devir/dakika)	102
Şekil 5.27. Döndürme momentine bağlı olarak duman koyuluğu değişimleri (2800 devir/dakika)	102
Şekil 5.28. Döndürme momentine bağlı olarak CO ₂ emisyonu değişimleri (1400 devir/dakika)	104
Şekil 5.29. Döndürme momentine bağlı olarak CO ₂ emisyonu değişimleri (2800 devir/dakika)	104

TABLolar LİSTESİ

Tablo 2.1.	Ayçiçek yağı içerisindeki yağ asitleri	19
Tablo 2.2.	Ayçiçek yağı içerisinde bulunan yağ asitlerinin özellikleri	19
Tablo 2.3.	Motorin ve bazı bitkisel yağların yakıt özellikleri	20
Tablo 2.4.	Biyodizelin özellikleri	24
Tablo 2.5.	Çeşitli ülkelerde uygulanan biyodizel standartları	25
Tablo 2.6.	Bazı bitkisel yağların kimyasal formülleri	27
Tablo 3.1.	Bazı ileri teknoloji seramiklerinin özellikleri	37
Tablo 3.2.	KSZ seramikler ve özellikleri	39
Tablo 4.1.	Deneyler sırasında kullanılan yakıtların fiziksel ve kimyasal özellikleri	61
Tablo 4.2.	Deneylerde kullanılan motorun teknik özellikleri	62
Tablo 4.3.	Hidrolik motor dinamometresinin teknik özellikleri	65
Tablo 4.4.	Egzoz emisyon ölçüm cihazı teknik özellikleri (GACO-SN)	67
Tablo 4.5.	Duman ölçer teknik özellikleri (VLT 2600S)	68

ÖZET

Anahtar Kelimeler: Düşük Isı Kayıplı Motor, Seramik Kaplama, Biyodizel, Ayçiçek Metil Esteri, Alternatif Yakıt

Benzin motorlarına kıyasla özgül yakıt tüketiminin düşük olması, daha fakir karışımla çalışabilmeleri ve yüksek sıkıştırma oranı sebebiyle bütün yüklerde daha verimli çalışması, orta ve ağır hizmet tipi araçlar için dizel motorlarını cazip kılmaktadır. Fakat benzin motoruna oranla daha fazla azot oksit ve duman emisyonu üretmeleri dizel motorlarının önemli dezavantajlarıdır.

Dizel motorunun mucidi Rudolf Diesel 1900'deki Paris Fuarında icat ettiği motorun çalışma prensibini gösterirken yakıt olarak yer fıstığı yağı kullanmış, fakat motor tasarımındaki kısıtlamalar onu petrol kökenli yakıtlara yönelmiştir. 1970'lerdeki petrol krizine kadar alternatif yakıtlar üzerinde pek durulmamış, bu tarihten sonra bitkisel esaslı yağlardan elde edilen yakıtlar üzerinde çalışılmaya başlamıştır.

Ham bitkisel yağlar acil durumlarda ve kısa süreli çalışmalarda dizel motorlarında güvenli bir şekilde kullanılabilir. Ancak uzun süreli kullanımlarda bitkisel yağın viskozitesinin yüksek ve uçuculuğunun düşük olması sebebiyle, yanma odasında aşırı karbon birikintisine, enjektör tıkanmasına, segman yapışmasına, soğukta ilk hareket zorluklarına, yakıt hattında tıkanmalara, yağlama yağının kalınlaşmasına ve yakıtın atomizasyonunun kötüleşmesine yol açmaktadır. Bu olumsuzluklar bitkisel yağın monoester oluşturacak şekilde transesterifikasyonu ile azaltılabilir ya da giderilebilir. Bu işlem ile elde edilen yakıt biyodizel denilmektedir. Her ne kadar transesterifikasyon ile elde edilen biyodizelin özellikleri dizel yakıtıninkine benzerse de, viskozitesi hala dizel yakıtıninkinden fazladır. Biyodizelin viskozitesinin daha da düşürülüp dizel motorlarında daha verimli bir şekilde kullanılabilmesini sağlamak için yakıt ısıtılarak motora gönderilebilir. Burada biyodizelin düşük ısı kayıplı motorlarda kullanımı gündeme gelmektedir. Düşük ısı kayıplı motorlarda yalıtım neticesinde artan gaz ve cidar sıcaklıkları yakıtın ısıtmaya gerek kalmadan daha verimli bir şekilde kullanılmasına imkan sağlayacaktır.

Bu çalışmada, önce motorin ve ayçiçek yağından üretilmiş biyodizel direkt püskürtmeli, aşırı doldurmalı, dört silindirli bir dizel motorunda yakıt olarak kullanılmıştır. Daha sonra motorun silindir kapağı ve supapları plazma sprey yöntemiyle 0,15 mm nikel-krom-alüminyum (NiCrAl) astar tabaka ve 0,35 mm yitriyumla stabilize zirkonya ($Y_2O_3ZrO_2$) ile kaplanarak deney motoru düşük ısı kayıplı (DIK) duruma getirilmiştir. Son olarak DIK motorda, standart motor ile aynı şartlarda motorin ve biyodizel yakıtları yeniden kullanılmıştır. Bulunan sonuçlar karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

Çalışma sonucunda her iki yakıt için seramik kaplama ile deney motorunun özgül yakıt tüketimi ve efektif veriminde iyileşme olurken, egzoz gazı sıcaklıklarında yükselme gerçekleşmiştir. Ayrıca, NO_x ve CO_2 emisyonları artarken, duman emisyonlarında azalma gözlenmiştir.

EFFECT OF BIODIESEL USAGE TO ENGINE PERFORMANCE AND EMISSION PARAMETERS IN A LOW HEAT REJECTION DIESEL ENGINE

SUMMARY

Keywords: Low Heat Rejection Engine, Thermal Barrier Coating, Biodiesel, Sunflower Methyl Ester, Alternative Fuel

Diesel engines are being attractive for medium and heavy duty vehicles because of their lower specific fuel consumption, capable of operating leaner mixtures and higher efficiency at all loads caused by higher compression ratio according to gasoline engines. But producing more NO_x and soot emissions according to gasoline engines are important disadvantages of diesel engines.

Rudolf Diesel, inventor of diesel engine, used groundnut oil to show the operating principles of this engine at the Paris Exposition of 1900; however engine design restrictions were directed him to petroleum based fuels. There were not enough studies about alternative fuels until the petroleum crisis of 1970s. Since then, the studies about vegetable oil based fuels have begun.

Raw vegetable oils can be safely used for emergency conditions and short period of operating time in diesel engines. But for long periods may results excessive carbon deposit in combustion chamber, injector plugging, piston ring sticking, difficulty of cold weather starting, plugging of fuel lines, thickening of lubricating oil and poor fuel atomization as the higher viscosity and poor volatility of vegetable oils. These negative nesses can be reduced or eliminated by transesterification of vegetable oil to form monoester. The fuel obtained by this process is known as biodiesel. Although, the properties of biodiesel obtained with transesterification are similar to those of diesel fuel, the viscosity is still higher than that of diesel fuel. To reduce biodiesel viscosity further and to obtain more efficiently usage in diesel engines, the fuel can be introduced to the engine by heating. Here, the usage of biodiesel in Low Heat Rejection engines has become current issue. The increased gas and wall temperatures caused by insulation can obtain efficiently use of fuel without heating.

In this study, firstly diesel fuel and biodiesel produced from sun flower oil were used as fuel in a direct injection, turbocharged, four cylinder diesel engine. Then, by coating of cylinder head and valves with 0.15 mm nickel-chrome-aluminum (NiCrAl) bond coat and 0.35 mm yttria stabilized zirconia (Y₂O₃ZrO₂) the engine was changed to low heat rejection (LHR) condition. Finally diesel fuel and biodiesel were tested in LHR engine, at the same conditions with standard engine.

At the end of study, specific fuel consumption and efficiency of test engine were improved and exhaust gas temperature was increased for both fuels with ceramic coating. It was also observed that while NO_x and CO₂ emissions increased, soot emissions decreased.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

Sanayileşme ve nüfus artışı sebebiyle dünyadaki enerji ihtiyacı giderek artmaktadır. Buna bağlı olarak dünya genelinde enerji açığı oluşmaktadır. Bu yüzden ülkeler enerji ihtiyaçlarını karşılamak için yeni kaynaklara yönelmektedirler. Enerji ihtiyacı ülkelerin gelişmişliğine bağlı olarak değişmektedir. Enerji üretiminde mümkün olduğunca yerel kaynakların kullanılması, çevrenin korunmasına dikkat edilmesi, verimliliğin artırılması, kaynak çeşitliliği ve sürekliliğinin sağlanması da önem kazanmaktadır. Enerji politikalarında temel alınması gereken unsur; teknolojik ve sosyal gelişmeyi destekleyecek şekilde enerji ihtiyacını karşılamak üzere sürekli, güvenilir, kaliteli, temiz ve ekonomik enerji türlerine yönelmektir [1].

1970'lerdeki petrol krizinden itibaren alternatif yakıtlar üzerindeki araştırmalar önem kazanmıştır. Metanol, etanol, sıkıştırılmış doğal gaz (CNG), sıvılaştırılmış petrol gazı (LPG), sıvı doğal gaz (LNG), bitkisel yağlar, yeni formüllü benzin ve dizel yakıt gibi pek çok yakıt alternatif olarak değerlendirilmeye çalışılmıştır. Bunların içerisinde sadece etanol ve bitkisel yağlar fosil kökenli değildir. Alkol yakıtlar klasik motorlarda yüksek verimle ve daha az emisyon üreterek yanabilirler. Fakat fosil kökenli yakıtlara göre daha az enerji içerirler. Etanolün ısıl değerinin dizel yakıtınıninkinin yaklaşık % 65'i kadar olması ve setan sayısının düşük olması dizel motorlarında kullanılması önündeki en önemli dezavantajlarıdır [2].

Benzin motorlarına kıyasla özgül yakıt tüketiminin düşük olması, daha fakir karışımla çalışabilmeleri ve yüksek sıkıştırma oranı sebebiyle bütün yüklerde daha verimli çalışması, orta ve ağır hizmet tipi araçlar için dizel motorlarını cazip kılmaktadır. Diğer taraftan benzin motorlarına oranla dizel motorları daha az karbon monoksit (CO) üretmelerine karşılık, 2-20 kat fazla azot oksit (NO_x) ve 30-100 kat fazla duman emisyonu üretirler [3-5].

Dizel motorlarında silindir içerisine emilen hava, piston yardımıyla 1/14 ile 1/22 değerine düşecek şekilde sıkıştırılmaktadır [6]. Benzin motoruna göre yaklaşık olarak iki misli sıkışan hava daha yüksek basınç ve sıcaklığa ulaşmaktadır. Bu sırada havanın içerisine püskürtülen yakıt kolaylıkla tutuşabilmektedir. Teorik olarak 1 kg yakıtta yaklaşık 15 kg hava gerekmektedir. Dizel motorlarında iyi bir yanma için bu miktarın 1,5 ile 2 katı kadar hava ile yanmayı gerçekleştirmek gereklidir. Kuşkusuz, kirletici bileşenlerin meydana gelmesi yanma olayına bağlıdır. Burada gerçek hava/yakıt oranı teorik tam yanma miktarından büyük olmasına rağmen silindir içindeki yakıt damlacıkları çevresinde yeterli miktarda hava temin edilememektedir. Bu ise eksik yanma ürünü olan is oluşumuna yol açmaktadır [7]. Dizel emisyonları kompleks karışımlar olup gaz ve partikül fazındaki organik ve inorganik bileşiklerden oluşurlar. Emisyonların bileşimi motor tipine, çalışma şartlarına, kullanılan yakıtta, yağlama yağına ve motorda emisyon kontrol sistemi olup olmamasına göre değişim gösterir [8].

Japon Ulusal Çevre Araştırmaları Enstitüsünün yaptığı bir çalışmada, dizel motorlarının ürettiği siyah duman kobay olarak kullanılan farelere enjekte edilmiştir. 0,6 mg enjekte edildiğinde kobayların yarısı, 0,9 mg enjekte edildiğinde ise kobayların tamamı ölmüştür. NO_x emisyonları ile ilgili olarak yapılan bir çalışmada ise 150 ppm ve üzerindeki NO_x'in ölümcül etkisi olduğu belirtilmiş, 300 ppm ve üzerindeki konsantrasyonlarda ise göğüs ve boğaz ağrısını takiben akciğer ödeminden ölümün gerçekleştiği belirtilmiştir [9]. Bu gerçekler ışığında dizel emisyonlarının ne kadar tehlikeli oldukları ve bu soruna bir çözüm bulunması gerektiği anlaşılmaktadır.

Egzoz emisyonlarının azaltılması yönünde alınan önlemler niteliklerine göre üçe ayrılmaktadırlar [10] :

- Kaynak öncesi önlem : Kullanılan yakıt bileşiminin kirletici emisyonları azaltıcı yönde hazırlanması.
- Kaynağında önlem : Kirletici bileşenlerin motorda yanma sırasında ve diğer motor içi kaynaklarda oluşumunu azaltmak (yanma odası şekli, sıkıştırma oranı, supap zamanlaması, aşırı doldurma vb.).

- Kaynak sonrası önlem : Oluşumuna engel olunamayan kirletici bileşenlerin daha sonra egzoz gazı içerisinde temizlemek (termik reaktör, katalitik konvertör, partikül filtresi vb.).

Sıkı emisyon sınırlamaları, araştırmacıları yakıtta değişiklik yaparak bu değerleri sağlamaya zorlamaktadır. Yakıtta oksijen katılmasının motorlu taşıtın egzoz emisyonunu azalttığı bulunmuştur [11,12]. Özellikle direkt enjeksiyonlu (DI) dizel motorlarında No.2 dizel yakıtına bitkisel yağ esteri katılmasıyla hidrokarbon (HC), CO ve partikül emisyonları azaltılabilirken, NO_x emisyonlarında ise kısmen artma ya da azalma olabileceği belirtilmektedir [12-16].

Rudolf Diesel 1900'deki Paris Fuarında icat ettiği motorun çalışma prensibini gösterirken yakıt olarak fıstık yağı kullanmış, fakat motor tasarımındaki kısıtlamalar ve bitkisel yağ fiyatlarının yüksek olması onu petrol kökenli yakıtlara yöneltmiştir. Bu tarihten itibaren bitkisel yağlar acil durumlarda zaman zaman kullanılmıştır. Geçen yüzyılın başlarında Alman Deutz firması ürettiği motorların bitkisel yağ ile çalışabileceğinin garantisini vermiştir. 1970'lerdeki OPEC petrol ambargosu öncesine kadar alternatif yakıtlar üzerinde pek durulmamış, bu tarihten sonra pek çok araştırmacı bitkisel esaslı yağlardan elde edilen yakıtlar üzerinde çalışmaya başlamıştır [2,17,18]. Araştırmacıların çoğu ham bitkisel yağların sadece acil durumlarda ve kısa süreli çalışmalarda dizel motorlarında güvenli bir şekilde kullanılabileceğini belirtmişlerdir. Uzun süreli kullanımlarda bitkisel yağın viskozitesinin yüksek ve uçuculuğunun düşük olması, sebebiyle yanma odasında aşırı karbon birikintisine, enjektör tıkanmasına, segman yapışmasına, soğukta ilk hareket zorluklarına, yakıt hattında tıkanmalara, yağlama yağının kalınlaşmasına ve yakıt atomizasyonunun kötüleşmesine yol açmaktadır [18-23]. Bu olumsuz etkiler bitkisel yağın monoester oluşturacak şekilde transesterifikasyonu ile azaltılabilir ya da giderilebilir. Transesterifikasyon işlemi ile trigliseridlerden, gliserol ayrıştırılarak yerine alkol radikali bağlanır. Bu işlem ile viskozite azalırken, setan sayısı ve ısı değeri aynı kalır. Dolayısıyla dizel motorunda herhangi bir değişikliğe gidilmeden kullanılacak yakıt elde edilir. Elde edilen bu yakıt biyodizel ya da biyomotorin olarak bilinir [24].

Her ne kadar transesterifikasyon işlemi ile elde edilen biyodizelin özellikleri dizel yakıtınınkinden benzerse de, viskozitesi hala dizel yakıtınınkinden fazladır. Biyodizelin viskozitesinin daha da düşürülüp dizel motorlarında daha verimli bir şekilde kullanılabilmesini sağlamak için yakıt ısıtılarak motora gönderilebilir. Burada biyodizelin düşük ısı kayıplı motorlarda kullanımı gündeme gelmektedir. Düşük ısı kayıplı motorlarda yakıtın neticesinde artan gaz ve cidar sıcaklıkları yakıtın ısıtmaya gerek kalmadan daha verimli bir şekilde kullanılmasına imkan sağlayacaktır. Literatürde düşük ısı kayıplı motorlar ve dizel motorlarında bitkisel yağ kullanılması ile ilgili pek çok çalışma mevcuttur. Fakat düşük ısı kayıplı motorlarda biyodizel kullanılması ile ilgili yeterince çalışma bulunmamaktadır.

Bu çalışmanın amacı; hem bitkisel yağın enerjisinden daha verimli bir şekilde faydalanabilmek, hem de bitkisel yağların kullanılması ile motorda olabilecek problemlerden bazılarının giderilebilme yollarını araştırmaktır.

Bu çalışmada düşük ısı kayıplı bir dizel motorunda yakıt olarak biyodizel kullanılmasının motor performans ve emisyon parametrelerine etkisi deneysel olarak incelenmiştir. Deneysel çalışmalarda direkt püskürtmeli Mercedes marka bir dizel motoru kullanılmıştır. Öncelikle hem motorin, hem de biyodizel için kısmi ve tam yük testleri yapılmıştır. Daha sonra motorun silindir kapağı ve supapları yaklaşık 0,15 mm kalınlığında NiCrAl bağlama tabakasının üzerine yaklaşık 0,35 mm kalınlığında kısmi stabilize zirkonya ($Y_2O_3ZrO_2$) atmosferik plazma kaplama tekniği ile kaplanarak deney motoru düşük ısı kayıplı hale getirilmiş, motorin ve biyodizel yakıtı için aynı testler yürütülerek sonuçlar karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir.

BÖLÜM 2. BİYODİZEL

Günümüzde kömür, petrol, doğal gaz gibi fosil kökenli birincil enerji kaynaklarının yanı sıra, yeni ve yenilenebilir enerji kaynaklarının değerlendirilmesi de önem kazanmaktadır. Bu kaynakların içerisinde “Biyokütle” büyük bir potansiyele sahiptir. Başlıca bileşenleri karbon ve hidrojen bileşikleri olan bitkisel ve hayvansal kökenli tüm maddeler “Biyokütle Enerji Kaynağı”, bu kaynaklardan üretilen enerji ise “Biyokütle Enerjisi” olarak tanımlanmaktadır. Odun, yağlı tohum bitkileri (kolza, ayçiçeği, soya v.b.), karbonhidrat bitkileri (patates, buğday, mısır v.b.), elyaf bitkileri (keten, kenevir, miskantus v.b.), protein bitkileri (bezelye, fasulye v.b.), bitkisel atıklar (sap, saman, kök v.b.), hayvansal atıklar ile şehirsal ve endüstriyel atıklar biyokütle enerji teknolojileri kapsamında değerlendirilmekte ve mevcut yakıtlara alternatif pek çok katı, sıvı ve gaz yakıtlar ortaya çıkmaktadır. Biyodizel ise biyokütle kökenli en önemli alternatif dizel yakıttır. Biyodizel ayrıca, biyomotorin ya da yeşil dizel olarak da bilinmektedir [25].

2.1. Dizel Yakıtlarının Genel Özellikleri

İçten yanmalı motorlarda yakıt enerjisinin ısı enerjisine dönüşümü silindir içinde yakıt ile hava arasındaki kimyasal reaksiyonla olur. Bunun için yakıt-hava karışımı en az kimyasal reaksiyon süresi kadar silindir içerisinde kalmalıdır. Bu nedenle motorlarda yanma olayını kısa sürede gerçekleştirebilecek özellikteki yakıtlar kullanılmalıdır. Uçuculuğu fazla olan hidrokarbonların kendi kendine tutuşma sıcaklığının yüksek olması hidrokarbonların genel bir özelliğidir. Bu sebeple uçuculuğu düşük ve kaynama sıcaklığı 250 ila 370 °C olan ham petrolün damıtılmasında orta sıcaklıklarda elde edilen kısımlar dizel yakıtı olarak daha uygundur. Dizel yakıtı içerisindeki hidrokarbonlar; parafinler, naftenler, olefinler ve aromatiklerdir. Bu hidrokarbonların karbon sayısı 12 ila 18 arasında değişmektedir [26]. Dizel yakıtının genel özellikleri aşağıda verilmiştir.

2.1.1. Setan sayısı

Setan sayısı, yakıtın dizel motorunda sıkıştırma sonucu ısınan havanın içinde kendi kendine tutuşma özelliğini belirleyen bir sayıdır. Setan sayısı arttıkça yakıtın kendi kendine tutuşma eğilimi artmaktadır. Bu ise benzin yakıtının tersine dizel yakıtında istenen bir özelliktir. Günümüz dizel yakıtında setan sayısı en az 40 olmaktadır. Böylece ilk hareket kolaylaşmakta, tutuşma gecikmesi azalmakta ve yanma odasında biriken yakıtın ani yanması ile oluşan hızlı basınç artışı önlenmektedir. Setan sayısı fazla yüksek olursa, tutuşma gecikmesi çok kısılacığından, yakıt yanma odası içerisinde iyi dağılamaz ve tamamen buharlaşmadan tutuşur. Bu durumda dumanlı bir yanma olur, tutuşma enjektör memesinin daha yakınında başlayacağından enjektör deliği üzerinde karbonlaşma tehlikesi doğabilir [6,10].

2.1.2. Viskozite

Viskozite, sıvıların akmaya karşı dirençlerinin ve iç sürtünmelerinin bir ölçüsüdür. Kinematik ve dinamik viskozite olarak ikiye ayrılır. Birbirinden 1m uzaklıktaki iki düzlem arasında 1m² alandaki sıvı tabakasının 1m/s² hızla kayması için gerekli olan Newton kuvvetine “dinamik viskozite”, dinamik viskozitenin yoğunluğa oranına ise “kinematik viskozite” denir. Kinematik viskozite birimi santistok (cSt) olup, 1 cSt 1 mm²/saniyedir. Sıvı yakıtların en önemli özelliklerinden birisi de kinematik viskozite kabiliyetidir. Dizel motorlarında kullanılan yakıtların viskoziteleri, aynı zamanda yakıt sistemini de yağladıklarından yüksek, fakat küçük enjektör deliklerinden püskürtülerek kolay parçalanmaları temin için de düşük olmalıdır [6,27].

Yakıtın viskozitesi, yakıt bir enjektörden veya dar bir kanaldan hava içerisine püskürtüldüğünde oluşacak hava demetini çok etkiler. Viskozite büyüdükçe yakıtın zerrelere ayrılması azalır, dolayısıyla iri yakıt zerreciklerinin nüfuz derinliği fazlalaşır. Viskozitesi çok yüksek olan yakıtlar nispeten soğuk olan silindir cidarlarına çarpmadan zerrelere halinde ayrılmayacaklarından dolayı yanma tam gerçekleşmez ve bu yüzden egzozdaki duman konsantrasyonu artar [28].

Viskozite küçüldükçe borulardaki akış direnci azalır. Püskürtme ile oluşan yakıt demeti içindeki yakıt damlacık çapları küçülür, yanma iyileşir ve duman miktarı da azalır. Viskozitenin çok düşük olması durumunda ise püskürtme sistemindeki kaçaklar artacaktır. Sıcaklık viskoziteye önemli derecede etki ettiğinden, viskozite her zaman sıcaklıkla birlikte verilmelidir. Motor yakıtlarının viskoziteleri 50°C’de 1,5-5 Engler derecesi olmalıdır. Viskozitesi 5 Engler derecesinin üzerinde olan yakıtlar 40-100°C’ye kadar ısıtılarak kullanılırlar [29].

2.1.3. Isıl değer

Yakıtın sahip olduğu enerjinin bir ölçüsüdür. Genellikle yakıtın birim kütlesinin enerjisi (kj/kg veya kcal/kg) ile verilmektedir. Yanma sonucu oluşan ürünlerin yanma öncesi referans bir sıcaklığa göre toplam entalpilerinin yakıt kütlesine bölünmesiyle elde edilir [28]. Ağırlık sınırlaması olan taşıtlar için kritik bir özelliktir. Dizel motorlarında ısıl değerleri çok farklı yakıtlar kullanılabilse de yakıtın ısıl değerinin fazla olması hem enjeksiyon sisteminin aldığı miktarı azaltmak hem de enjeksiyon sistemindeki parçaların kullanım ömrünü arttırması bakımından önemlidir [27]. Motorlardaki yanma sonu sıcaklıklarında su her zaman buhar olarak bulunduğu için ısıl değer, alt ısıl değer (Hu) olarak verilmelidir. Petrol yakıtlarının API (American Petroleum Institute) özgül ağırlıklarına göre ısıl değerlerinin belirlenmesi için aşağıdaki eşitlikler kullanılır;

$$H_a = 42.860 + 93(\text{API} - 10) \quad (2.1)$$

$$H_u = 0,7190(\text{ÜID}) + 10.000 \quad (2.2)$$

H_a -Üst Isıl Değer (kj/kg)

H_u -Alt Isıl Değer (kj/kg)

API-derece cinsinden API özgül ağırlığı [30].

2.1.4. Özgül ağırlık

Özgül ağırlık (Ö.A.) sıvı yakıtların yoğunluğunun bir ölçüsüdür. 15,6°C (60°F) sıcaklıktaki yakıtın yoğunluğunun, aynı sıcaklıktaki suyun yoğunluğuna oranına

“özgül ağırlık” denir. Suyun yoğunluğu 1 kg/l’dir. Böylece yakıtın özgül ağırlığı da kg/l cinsinden kendi yoğunluk değerine eşittir. Özgül ağırlık ne kadar küçük ise yakıt o kadar kolay tutuşur. Sıvıların yoğunluğu sıcaklığın artması ile hafif bir şekilde düşer. API, özgül ağırlıklar için özel bir ölçek düzenlemiştir. API derecesi olarak isimlendirilir ve aşağıdaki gibi hesaplanır [30];

$$\text{API derecesi} = (141/\bar{O}.A.)-131,5 \quad (2.3)$$

2.1.5. Duman ve akma noktası

Bir sıvı yakıt soğutulduğunda belli bir sıcaklıkta yakıt molekülleri daha büyük sıvı kristalleri oluşturur, soğutmaya devam edildiği takdirde daha fazla sıvı kristali oluşur ve tüm yakıt katılaşana kadar kristaller yığılır. Kristallerin görülmeye başladığı sıcaklığa “dumanlama noktası” denir. “Akma noktası” ise yakıtın akmasının durduğu en yüksek sıcaklıktır. Dumanlama noktası, akma noktasının 4,5~5,5 °C üzerindedir. Daha yüksek kaynama aralığındaki ağır yakıtlar için önemlidir. Özellikle soğuk havalarda dizel yakıtının motor üzerindeki akışını yakıtın akma noktası belirler. Dizel yakıtının akma noktası yüksek olursa yakıt motor üzerinde akamayacak ve bu sebeple motor çalışmayacaktır. Bu yüzden yakıtın akma noktası ortam sıcaklığından 5~10 °C düşük olmalıdır [30].

2.1.6. Parlama ve alevlenme noktası

Yakıtların yanma sıcaklık derecesinden çok daha düşük bir sıcaklıkta, alev yaklaştırılınca parladığı görülür. Bunun sebebi, içlerinde yanabilecekleri sıcaklıktan daha düşük sıcaklıklarda buhar durumuna geçebilen maddelerin bulunmasıdır. Bunların da parladıkları noktadaki sıcaklık değeri o yakıtın alev alma tehlikesinin tanınmasına yarar. Parlama noktası çok düşük olan yakıtlara düşük sıcaklıkta kibrit, sigara gibi açık bir ateş veya alev yaklaştırılması oldukça tehlikelidir. “Alevlenme noktası” ise tutuşma buharının sönmeden devam ettiği sıcaklıktır. Alevlenme sıcaklığı, parlama sıcaklığından biraz yüksektir. Genellikle bir yakıtın kaynama noktası ne kadar düşük olursa, alev alma noktası da o kadar düşük olur. Bu bakımdan

dizel yakıtları gibi buharlaşma sıcaklıkları nispeten yüksek yakıtlar daha emniyetlidirler [27,31].

2.1.7. Uçuculuk

Sıvı yakıtların yanmadan önce buharlaşması gerekir. Uçuculuk sıvı yakıtların buharlaşabilme yeteneğini ifade eder. Düşük sıcaklıklarda kolayca buharlaşabilen yakıtlar, buharlaşabilmek için daha yüksek sıcaklıklara ihtiyaç duyan yakıtlardan daha fazla uçucudurlar [30]. Uçuculuk özellikle motor soğuk iken ilk hareketi kolaylaştırmak ve dumansız bir yanma için önemlidir. Uçuculuğu düşük olan yakıtlar en iyi gücü temin edebilmek ve dumanı azaltabilmek amacıyla yüksek hızlı motorlar için uygundur [32].

2.1.8. Kükürt ve kül

Ham petrolün içerisinde kükürt bileşikleri bulunur. Bunların çoğu damıtma sırasında arıtılır. Kükürt, yakıtın içerisinde istenmeyen bir maddedir. Yanma esnasında oluşan kükürt oksitler asit haline dönüşerek motor parçalarında korozyona yol açar ve silindir cidarı ile segmanların aşınmasını hızlandırır.

Kül, küçük katı parçacıklardan ve yağ ya da yakıtın içerisinde bulunan suda çözünebilir metalik bileşiklerden oluşur. Kül miktarı, az miktar yakıt içerisindeki tüm yanıcı maddelerin yanması ile ölçülür. Yanmayan artıklar kül olarak isimlendirilir ve yanmış yakıt örneğinin ağırlığının yüzdesi olarak belirtilir. Özellikle dizel yakıtı için önemlidir. Enjeksiyon sistemindeki kapalı rekor parçalarının aşınmasına ve yakıt filtresi ile enjektör deliklerinin tıkanmasına yol açar [30].

2.2. Dizel Yakıtından İstenilen Özellikler

Dizel motorlarında yakıt, sıkıştırma zamanının sonuna doğru yanma odasına püskürtülür. Bu anda, silindirdeki hava sıcaklığı, sıkıştırma oranına bağlı olarak 400-500 °C arasındadır. Her ne kadar yakıtın uçuculuğu, karışım teşkilini etkilerse de, bu

ikinci mertebeden bir etkidir. Dizel motoru için birinci derede önemli olan yakıtın kendi kendine tutuşma özelliğidir. Dizel motorunda yakıt buharı-hava karışımının sıkıştırma sonu basınç ve sıcaklıklarında kendi kendine tutuşabilmesi için dizel yakıtların tutuşma meyillerinin, benzinin aksine yüksek olması istenir. Tutuşma meyilinin düşük, yani tutuşma gecikmesinin zaman olarak büyük olması durumunda yanma için ayrılabilen krank mili açısı aralığı azalır. Ayrıca tutuşma gecikmesi süresince yanma odasında biriken ve ani olarak yanan yakıt miktarı da artacağından mekanik zorlanmalara neden olan yüksek basınçlar ortaya çıkar (dizel vuruntusu) [29,33].

Akma noktası, viskozite ve özgül ağırlık da, dizel motorlar için önemli yakıt özellikleridir. Akma noktası, yakıtın soğuk hava şartlarında, depodan motora gelmesi ve filtrelerden süzülmesi açısından, viskozite ise püskürtme sistemi açısından çok önemlidir. Püskürtme pompası ve enjektörler çok küçük toleranslarla işlenmiş elemanlardır. Bu sebeple yakıtın yağlama özelliği bu parçaların çalışması ve ömrü bakımından büyük önem taşır. Soğuk havalarda dizel motor yakıtları, mum kristallerinin oluşmaya başladığını gösteren bulanık bir renk alır ve sıcaklığın daha fazla düşmesiyle, akıcılığını tamamen kaybederek katılaşır. Yakıtların, bu özelliği, soğuk filtre tıkanma noktası ölçülerek belirtilir. Bu nokta, delik aralığı standartlaştırılmış bir süzgeçten geçerken, akışın tamamen durduğu sıcaklık olarak ölçülür [33].

Yakıtları birbiriyle karıştırmak suretiyle, özellikleri kuvvetli bir şekilde etkilemek mümkündür. Hiçbir yakıt, mükemmel yakıt değildir. Bir açıdan çok iyi olan bir yakıt, başka bir açıdan çok kötü olabilir. Mesela parafin oranının yüksek olması, dizel motorunda tutuşma özelliklerini olumlu etkilerken, düşük sıcaklık performansını kötüleştirir. Benzer şekilde aromatik yüzdesi yakıtın ısı değerini artırırken, motorun sert çalışmasına ve duman oluşumuna yol açar [33].

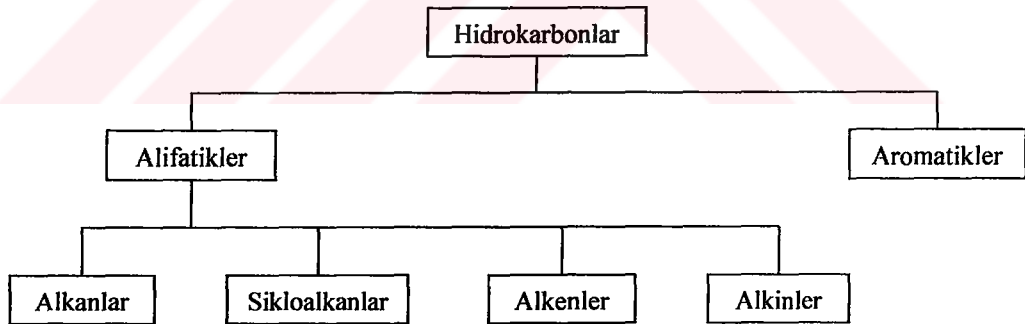
2.3. Hidrokarbon Esaslı Dizel Yakıtlarının Kimyasal Yapısı

Motor yakıtlarının büyük bir kısmı sıvı yakıtlardır. Bunlar hidrojen ve karbon içeren değişik tip moleküllerden oluşur ve önemli bir miktarı ham petrolün damıtılması

veya kimyasal parçalanma ya da kimyasal kraking yoluyla elde edilmektedir. Ana elementlerine dayanarak bunlara hidrokarbon adı verilmektedir. Genellikle “HC” sembolü ile gösterilirler [28].

Daha fazla uçucu olan HC’ların kendi kendine tutuşma sıcaklığının yüksek olması HC’ların genel bir özelliğidir. Bu yüzden daha az uçucu olan ve kaynama sıcaklığı 250 ila 370°C aralığında olan, ham petrolün damıtılması sırasında orta sıcaklıklarda elde edilen kısımlar dizel yakıtı olarak daha uygundur. Dizel yakıtı içerisinde bulunan HC’lar; parafinler, naftenler, olefinler ve aromatiklerdir. Bunların yanı sıra az miktarda azot, kükürt, oksijen, kobalt, çinko, fosfor, potasyum ve magnezyum içerirler [26].

HC’lar alifatik ve aromatik olarak temelde iki ana sınıfa ayrılırlar. Alifatikler benzen grubu ya da halkası içermezler fakat bunların tersine aromatikler tek ya da daha fazla benzen halkası içerirler. Alifatikler, alkanlar (parafinler), alkenler (olefinler) ve alkinler (naftenler) olarak üç gruba ayrılırlar. HC’ların sınıflandırılması Şekil 2.1’de gösterilmiştir [34].



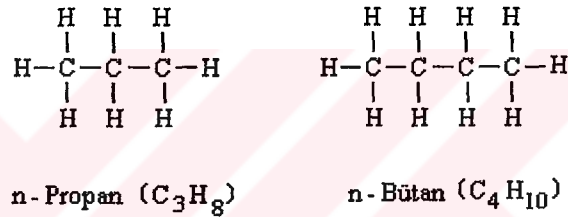
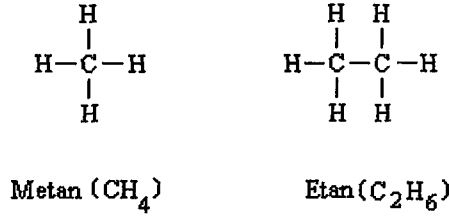
Şekil 2.1. HC’ların genel sınıflandırılması [34].

2.3.1. Parafinler (Alkanlar)

Genel formülleri C_nH_{2n+2} ($n=1,2,3\dots$) şeklindedir. Temel özellikleri sadece bir tane kovalent bağlarının olmasıdır. Bu bileşiklerde bağlar doymuş olduğundan daha fazla hidrojen bağlanamaz. Dolayısıyla doymuş HC’lar olarak bilinir. Isıl değerleri büyük, yoğunlukları düşüktür ($620-770 \text{ kg/m}^3$). Karbon atomlarının birbirine bağlanış şekline göre iki gruba ayrılırlar :

Normal parafinler (düz zincir grubu) :

Karbon atomları sıra şeklinde bağlıdır. Karbon ismine “-an” son takısı getirilerek isimlendirilirler. Ayrıca izomerlerden ayırmak için “normal, “n-“ ön takısı ile belirtilirler. Şekil 2.2’de ilk dört ($n = 1-4$) alkanın yapıları görülmektedir.

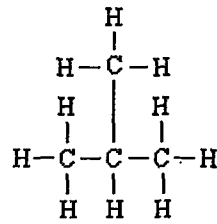


Şekil 2.2. İlk dört alkanın yapıları, açık ve kapalı gösterimleri [34].

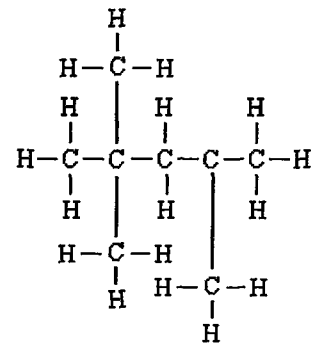
Her karbon atomunun dört bağlantı kolu da dolu olduğundan bunlara “doymuş hidrokarbon” denilmektedir. Bağlar kolayca parçalanabildiğinden tutuşma meyilleri genel olarak yüksektir ve dizel motoru yakıtı için uygundur [28,29,34].

İzo parafinler (çatallı zincir grubu) :

Aynı sayıda karbon (C) ve hidrojen (H) atomu olmasına rağmen “dallanmış zincir” şekline sahip olan moleküllerin kimyasal özellikleri çok farklı olmaktadır. Bunları belirtmek için parafin isminin önüne “izo, i-“ ön takısı getirilir. Bunlar da doymuş gruba girmektedir. Ancak bazı karbon atomları genel zincir yapının üzerine çatallı bir şekilde yerleşmiştir. Grubun düz zincir kısmını oluşturan karbon atomu sayısına ve dallanma yerlerine göre özel isim alırlar. Şekil 2.3’de bazı izo-parafinlerin yapısı gösterilmiştir.



i-Bütan (C_4H_{10})
(2-metil Propan)



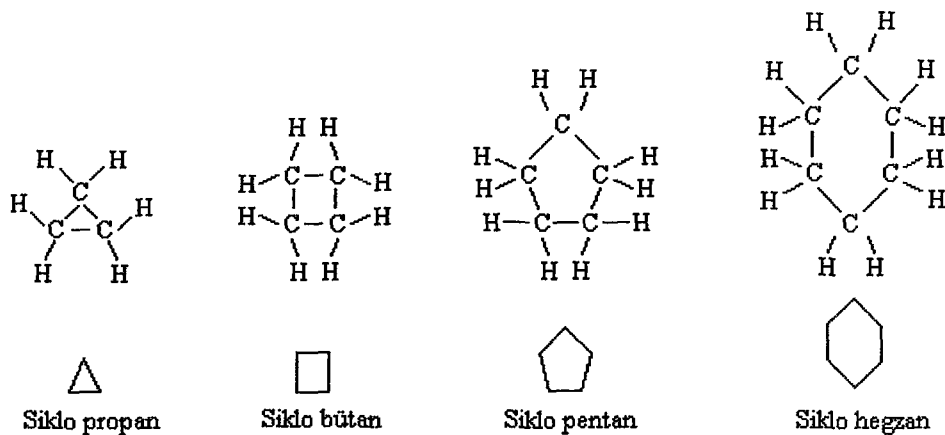
i-Oktan (C_8H_{18})
(2,2,4-trimetil Pentan)

Şekil 2.3. Bazı izo-parafinlerin yapısı [29].

İzo-bütan ve izo-oktanın yukarıdaki diziliş şekline 2-metil propan ve 2,2,4 trimetil pentan denilmektedir. Burada propan ve pentan düz zincirdeki karbon atomu sayısını belirtir. Metil (CH_3) grupları ise propanın ikinci karbonuna, pentanın da iki adet ikinci karbonuna ve dördüncü karbonuna bağlanarak dallanmış yapıyı oluştururlar. Kapalı formülleri aynı, açık formülleri farklı olan yakıtlar tamamen farklı özellikler gösterebilirler. Tutuşma eğilimleri, dolayısıyla vuruntu eğilimleri azdır. Benzin motoru yakıtı olarak çok uygundurlar [29].

2.3.2. Naftenler (Sikloparafinler)

Genel formülleri C_nH_{2n} olan HC'lardır. Kapalı formlarına atfen siklo parafin adını alırlar. Naftenler benzedikleri parafin isminin başına "siklo-" ön takısı eklenerek isimlendirilirler (Şekil 2.4).

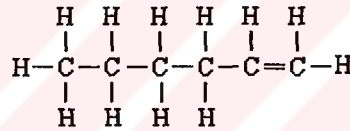


Şekil 2.4. İlk dört siklo alkanın yapısı ve basitleştirilmiş şekilleri [34].

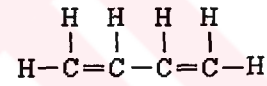
Yapıları halka şeklinde kapalı olduğu için parçalanmaları zor ve tutuşma meyilleri normal parafinlerden daha azdır. Hidrojen sayısı az olduğundan ısı değerleri az, yoğunlukları yüksektir ($740-790 \text{ kg/m}^3$). Hem benzin hem de dizel motoru yakıtı olarak kullanılabilirler [28,29].

2.3.3. Olefinler (Alkenler)

Şekil 2.5'te görüldüğü gibi, olefinler bazı karbon atomları çift bağlı doymamış HC'lerdir. Bir adet çift bağ varsa mono-olefin (C_nH_{2n}), iki adet çift bağ varsa dio-olefin (C_nH_{2n-2}) adını alırlar. Mono olefinler karbon isminin sonuna "-en" takısı alır. Dio-olefinler ise karbon isminin sonuna "-ien" takısı konularak isimlendirilirler. Isıl değerleri düşük, yoğunlukları $620-820 \text{ kg/m}^3$ arasındadır. Tutuşma meyilleri azdır. Benzin motoru yakıtı olarak kullanılabilirler. Tutuşma meyilleri artırılırsa dizel yakıtı olarak da kullanılabilirler. Serbest bağları nedeniyle kimyasal olarak çok aktiftirler. Hidrojenle kolayca birleşerek parafin veya naftenleri oluştururlar [28,29].



Hegzen (mono - olefin)

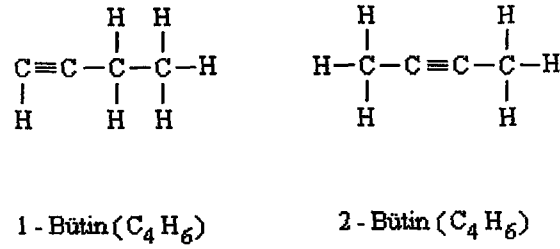


Bütadien (dio - olefin)

Şekil 2.5. Hegzen ve bütadien'in açık gösterimi [29].

2.3.4. Alkinler (Asetilenler)

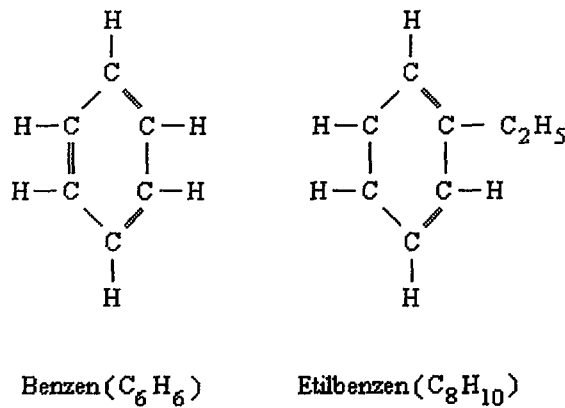
Alkinler en az bir tane üçlü C-C bağı içerirler. Genel formülleri C_nH_{2n-2} ($n = 2,3,4\dots$) şeklindedir. Üçlü bağ ($C \equiv C$) içeren bileşik isminin sonuna "-in" eki getirilir. En uzun zincirdeki C atomu sayısına göre isimlendirilirler (Şekil 2.6). Üçlü bağın olduğu yer isimlendirmede gösterilir [34].



Şekil 2.6. 1-bütün ve 2-bütün'in açık gösterimi [34].

2.3.5. Aromatikler (Benzen türevleri)

Altı karbonlu benzen yapısına H veya C ve H'den oluşan grupların bağlandığı HC'lerdir. Aromatikler kimyasal yönden diğer doymamış HC'lara göre daha kararlıdır. Halka şeklinde yapıları ve çok sayıda çift bağlı karbon atomları sebebiyle tutuşma meyilleri düşüktür (Şekil 2.7). Keskin kokuları yüzünden "aromatlar" olarak isimlendirilirler. Kapalı formülleri $\text{C}_n\text{H}_{2n-6}$ 'dır. Daha çok kömürden yapay olarak elde edilirler ve vuruntu mukavemetini artırmak için benzine katılırlar. Ancak kanserojen olduklarından katkı miktarı sınırlandırılmaktadır. Ayrıca, yanma sırasında duman oluşumuna, aşırı oranda çözünürlüğü sebebiyle de contaların bozulmasına neden olmaktadır. Diğer çeşit yakıtlardan daha fazla su tutabilmektedir. Yakıt bünyesinde tutulan su, düşük sıcaklıklarda donarak arızalara yol açabilmektedir. Ticari hayatta benzol olarak bilinirler [28,29,33].



Şekil 2.7. Benzen ve etil benzen'in açık gösterimi [28].

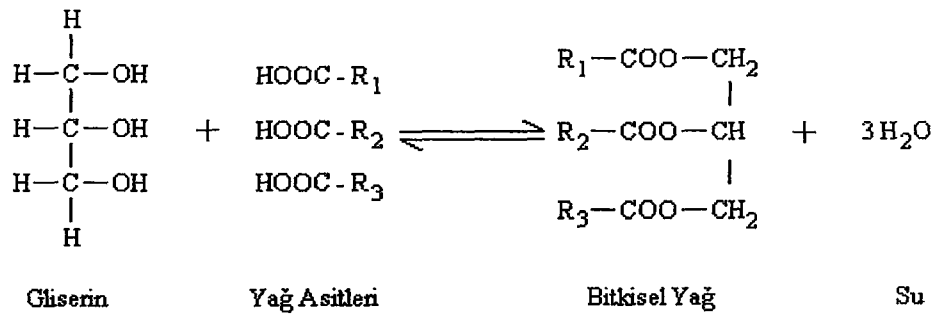
HC'lar içerisinde yoğunluğu en yüksek olan ($800-850 \text{ kg/m}^3$) aromatiklerdir. Dolayısıyla birim hacim başına en yüksek ısıl değere, fakat birim kütle başına da en

düşük ısısal değere sahip olmaktadır. Karbon atomları arasındaki bağlar sağlam olduğundan vurutuya karşı dayanıklı olan aromatiklerin oktan sayıları yüksektir. Benzin motoru yakıtı olarak kullanılmaya elverişli olup, Setan sayıları yüksektir [28,29].

2.4. Bitkisel Yağlar

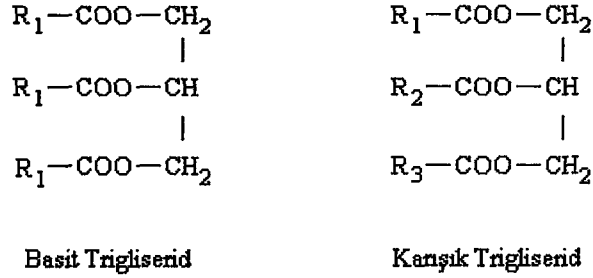
Petrolün belirli bir rezerve dayalı sonlu kaynak olması ve içten yanmalı motor teknolojisinin de büyük oranda petrole bağlı olarak gelişmesi, mevcut teknolojiye fazla bir değişiklik yapmadan, dizel yakıtına alternatif olabilecek yeni yakıtların araştırılarak ortaya konulmasını zorunlu hale getirmiştir. Bu konuda özellikle, ülkemizde de olduğu gibi tarımsal potansiyeli yüksek olan ülkelerde bitkisel yağlar ön plana çıkmaktadır. Bitkisel yağlar bazı tarım ürünlerinin meyve, çekirdek ve tohumlarından elde edilen yağlardır. Türkiye’de en çok üretilen bitkisel yağlardan bazıları şöyle sıralanabilir; Ayçiçek, zeytin, mısır, pamuk tohumu, yerfıstığı, soya, susam, kolza, aspir, haşhaş, keten ve kenevir tohumu [35,36].

Bitkisel yağlar, yağ asitlerinin (R-COOH), üç değerli bir alkol olan gliserinle yapmış olduğu esterlerdir (Şekil 2.8). Bu gliserid olarak adlandırılır. Gliserin molekülündeki üç alkol grubunun yağ asitleri ile esterleşmesi durumunda ise trigliserid elde edilir. Trigliseridler normal yağların % 95’lik kısmını oluşturmaktadır. % 5’lik kısmı ise mono ve digliseridlerden oluşmaktadır.



Şekil 2.8. Yağ asitlerinin gliserinle esterleşmesi [32].

Gliserinin üç karbon atomunun da aynı yağ asidi ile esterleşmesi halinde basit trigliserid, farklı yağ asitleri ile esterleşmesi halinde karışık trigliserid adı verilir [32,36]. Basit ve karışık trigliseridler Şekil 2.9'da görülmektedir.



Şekil 2.9. Basit ve karışık trigliserid [32].

Bir yağın fiziksel ve kimyasal özellikleri yağı oluşturan yağ asitlerinin cinsine bağlıdır. Yağ asitleri $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_n\text{COOH}$ genel formülü ile gösterilir. Yağ asitleri doymuş ve doymamış olarak aralarında ikiye ayrılır [37].

2.4.1. Doymuş yağ asitleri

Karbon-Karbon (C-C) bağları tek bağdan oluşmaktadır. Genel formülleri R-COOH'dır. Burada R hidrokarbon zincirini gösterir. Bitkisel yağlarda doymuş yağ asitlerinden stearik ($\text{CH}_3-(\text{CH}_2)_{16}-\text{COOH}$) ve palmitik ($\text{CH}_3-(\text{CH}_2)_{14}-\text{COH}$) yağ asitleri bulunur. Erime ve kaynama noktaları zincir uzunluğu arttıkça artar [32,38].

2.4.2. Doymamış yağ asitleri

Moleküllerinde bir veya daha çok sayıda çift bağ bulunur. Zincir formunda dallanmamış mono karboksili asitlerin içinde, alken asitleri grubuna dahildirler. Yağ asitleri bir çift bağ içerdikleri zaman tekli doymamış (monoenoik), iki ya da daha fazla çift bağ içerdikleri zaman çoklu doymamış (polyenoik) olarak isimlendirilirler [32]. Tekli doymamış yağ asitlerinin genel formülü Denklem 2.4.'de verilmiştir.

$$R - \text{CH} = \text{CH} - (\text{CH}_2)_7 - \text{COOH}, \text{C}_n\text{H}_{2n}\text{O}_2 \quad (2.4)$$

Çoklu doymamış yağ asitlerinin genel formülü $C_nH_{2n-X}O_2$ şeklinde olup, X moleküldeki çift bağ adedinin 2 katıdır [27].

Bazı bitkisel yağlarda bulunan önemli doymamış yağ asitleri şunlardır [32]:

Oleik asit ($C_{17}H_{33}COOH$, 9 oktadekadienoik asit), Linoleik asit ($C_{17}H_{31}COOH$, 9-12 oktadekadienoik asit), Linolenik asit ($C_{17}H_{29}COOH$, 9-12-15 oktadekatrienoik asit), Arachidonik asit ($C_{19}H_{31}COOH$, 5-8-11-14 eikosatetraenoik asit).

2.4.3. Gliserin

Gliserin üç hidroksil grubu taşıyan bir alkoldür. Yağ ve yüksek yağ asitlerinin aksine klorofon, benzen, petrol eteri ve eter gibi yağ çözücülerde çözünmeyip, su ve alkolde çözünmektedir. Kokusuz, hafif, tatlı, ergime noktası $20^\circ C$, kaynama noktası $290^\circ C$ olan bileşiklerden oluşmaktadır [27].

2.4.4. Ayçiçek yağı

Ayçiçek yağı, Compositae familyasından Helianthus annuus bitkisinin tohumlarından (yağ içeriği % 20-36) elde edilmektedir. Ülkemizde ayçiçeği üretiminin % 90'ı Trakya bölgesinde gerçekleştirilmektedir. Ayçiçeği bitkisi kuraklığa karşı dayanıklıdır. Ancak çok kurak iklimlerde iyi sonuç vermemektedir. Bitkinin çiçek devresinde ve tohumların olgunlaşması sırasında sıcaklığa ihtiyacı vardır. Bu sıcaklık tohumun içerdiği yağın bileşimini ve özellikle yağ asitlerinin oranını etkilemektedir. Ham ayçiçek yağının $40^\circ C$ 'deki viskozitesi 60-80 cSt'dir [32,39]. Ayçiçek yağı içerisinde bulunan yağ asitleri Tablo 2.1'de verilmiştir. Ayçiçek yağı yaklaşık % 15 doymuş, % 85 doymamış yağ asidi içerir. Bu asitler içerisinde linolenik asit % 2'den daha az düzeyde bulunur.

İklim, sıcaklık, genetik faktörler, tarlada tohumun bulunuş durumu ayçiçek yağının kompozisyonunu etkiler. Yağ, kabuğu soyulan tohumlardan preslerle, presleme veya solvent ekstraksiyonu yolu ile elde edilmektedir.

Tablo 2.1. Ayçiçek yağı içerisindeki yağ asitleri [39].

Yağ Asidi	Miktar (%)	Yağ Asidi	Miktar (%)
Miristik asit	< 0,2	Palmitik asit	4-9
Stearik asit	3-6	Araşidik asit	< 1
Behenik asit	0,5-1,5	Lignoserik asit	< 0,5
Palmitoleik asit	< 0,5	Oleik asit	14-35
Linoleik asit	50-75	Linolenik asit	< 0,1
Gadoleik asit	< 0,1	-	-

Ayçiçek yağı içerisinde bulunan yağ asitlerinden özellikle palmitik asit, stearik asit, oleik asit, linoleik asit ve linolenik asit, toplam asit ağırlığının % 99'unu oluştururlar. Bu asitlerin kimyasal yapıları ve bazı fiziksel özellikleri Tablo 2.2'de görülmektedir.

Tablo 2.2. Ayçiçek yağı içerisinde bulunan yağ asitlerinin özellikleri [38].

Yağ Asidi	Kimyasal Formülü	Ergime Sıcaklığı (°C)	Kaynama Sıcaklığı (°C)
Palmitik	$\text{CH}_3-(\text{CH}_2)_{14}-\text{COOH}$	63	198
Stearik	$\text{CH}_3-(\text{CH}_2)_{16}-\text{COOH}$	70	383
Oleik	$\text{CH}_3-(\text{CH}_2)_7-\text{CH}=\text{CH}-(\text{CH}_2)_6-\text{COOH}$	13	286
Linoleik	$\text{CH}_3-(\text{CH}_2)_4-\text{CH}=\text{CH}-\text{CH}_2-\text{CH}=\text{CH}-(\text{CH}_2)_7-\text{COOH}$	-5	202
Linolenik	$\text{CH}_3-(\text{CH}_2)_2=\text{CH}-\text{CH}_2-\text{CH}=\text{CH}-\text{CH}_2-\text{CH}=(\text{CH}_2)_7-\text{COOH}$	-24	230

2.5. Bitkisel Yağların Yakıt Özellikleri

Bitkisel yağların, yakıt olarak kullanılabilme imkanlarının araştırılması amacıyla, yakıt özelliklerinin belirlenmesi konusunda günümüze kadar pek çok çalışma yapılmıştır. Dizel yakıtı için belirlenmiş sınır değerleri ile karşılaştırılarak bitkisel yağların yakıt olarak uygunlukları ortaya konulabilmektedir. Tablo 2.3'de motorin ve bazı bitkisel yağların yakıt özellikleri karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Bitkisel yağların viskozitelerinin ASTM limitlerine göre (1,9-4,1 cSt) motorinin yaklaşık 10-20 katı kadar yüksek olduğu görülmektedir. Bu yağların viskozitelerinin yüksek olması molekül ağırlıklarının fazla olmasından (600-900 kg/mol, motorinin yaklaşık

Tablo 2.3. Motorin ve bazı bitkisel yağların yakıt özellikleri [35].

	Özgül ağırlık (g/ml)	Kinematik viskozite(cSt)	Isıl değer (kJ/kg)	Setan Sayısı (ASTM D613)	Donma noktası (°C)	Akma noktası (°C)
Ayçiçek	0,92	34,9	39.644	33	7,2	-15
Soya	0,92	36,4	39.390	39	-3,9	-12,2
Pamuk	0,91	37,4	37.420	51	1,7	-15
Kolza	0,92	39	39.913	37,6	-3,9	-31,7
Motorin	0,86	2,9	42.450	50,8	-15	-33
Karbon kalıntısı	Tüm bitkisel yağlarda % 0,22-0,30 (ASTM sınır değeri % 0,35)					
Kükürt oranı	Tüm bitkisel yağlarda % 0,01 (ASTM sınır değeri % 0,5)					
Kül oranı	Tüm bitkisel yağlarda % 0,005-0,01 (ASTM sınır değeri % 0,01)					
Su ve tortu	Tüm bitkisel yağlarda % 0,05 (ASTM sınır değeri % 0,05)					

üç katı) ve kimyasal yapılarından kaynaklanmaktadır. Setan sayısı açısından bitkisel yağların ASTM alt sınırı olan 40'a yaklaşıkları görülmektedir. Bu açıdan pamuk yağı daha uygundur. Bünyelerindeki oksijen dolayısıyla bitkisel yağların ısıl değeri daha düşüktür. Bitkisel yağların ısıl değeri motorinin yaklaşık % 90'ı kadardır. Bu değer motorun optimum çalışması için önemlidir. Araştırma bulgularına göre; bitkisel yağların çoğunun donma ve akma noktaları açısından uygun oldukları görülmektedir. Yine tutuşma noktası değeri, motorine göre çok daha yüksektir. Yakıt içerisindeki su ve tortu miktarının, ele alınan birçok bitkisel yağda ASTM sınır değerleri içerisinde kalmıştır. Karbon kalıntısı ile kül ve kükürt oranı açısından da sınır değerler aşılmamıştır. ASTM yöntemi ile oksitlenme süresi motorin için 150 saatin üzerinde olduğu halde, bitkisel yağlar için bu süre 2,9-10 saat arasındadır. Bu durum ise bitkisel yağların depolanması bakımından sorun oluşturmaktadır [26,36,40,41].

2.6. Dizel Yakıtı Olarak Bitkisel Yağların Performansı

Bitkisel yağların, dizel motorlarında doğrudan kullanılması çeşitli sorunlara yol açmaktadır. Bitkisel yağların dizel motorlarındaki püskürtme, atomizasyon ve yanma karakteristikleri HC esaslı dizel yakıtlarına göre çok farklıdır. Bitkisel yağların yüksek viskozitesi, püskürtme işlemini olumsuz etkileyeceğinden yakıtın

atomizasyonu kötüleşecektir. Hava ile bitkisel yağın düzgünce karışmaması eksik yanmaya yol açacaktır. Yüksek viskozite ayrıca enjektörlerin tıkanmasına, segmanlarda karbon birikintisine ve yağlama yağının bozulmasına yol açmaktadır. Parlama noktasının yüksek olması, uçuculuk özelliğinin az olduğunu gösterir. Bu ise yanma odasında daha fazla birikintiye, enjektör ucunda karbonizasyona ve segman yapışmasına yol açmaktadır. Viskozitenin yüksek, uçuculuğun düşük olması soğukta ilk hareket zorluğuna, alev sönmesine ve tutuşma gecikmesinin uzamasına yol açmaktadır. Bitkisel yağların oksidatif ve ısıl polimerizasyonu enjektör üzerinde yakıt birikmesine yol açarak yanmayı kötüleştirmektedir. Uzun süreli çalışmada gom oluşumuna, enjektör tıkanmasına ve segman yapışmasına yol açmaktadır [26,42,43].

Bütün bu olumsuz faktörler motor bakım masraflarını artırıcı ve motorun ömrünü kısaltıcı yönde etki etmektedir. Bitkisel yağların alternatif dizel yakıtı olarak değerlendirilebilmesi için, öncelikle yüksek viskozite probleminin çözülmesi gerekmektedir. Buna göre yüksek viskozite problemi ya püskürtme basınç ve zamanının değiştirilmesi gibi motorda bir takım değişiklikler yapılarak ya da bitkisel yağlara ısıl veya kimyasal yöntemler uygulanarak çözülmeye çalışılmaktadır.

2.7. Biyodizel ve Üretim Yöntemleri

Dizel motorlarında kullanılmak üzere bitkisel ya da hayvansal yağlar gibi yenilenebilir kaynaklardan üretilen, uzun zincirli yağ asitlerinin mono alkil esterleri biyodizel olarak tanımlanır. Bitkisel yağlardan biyodizel elde edilmesi konusundaki çalışmaların çoğunluğunu, yüksek viskozitenin azaltılması oluşturmaktadır. Viskozitenin azaltılmasında ısıl ve kimyasal olmak üzere iki yöntem uygulanmaktadır. Isıl yöntemde, yakıt olarak kullanılacak bitkisel yağın sıcaklığı ön ısıtma ile artırılarak viskozitenin düşmesi amaçlanmaktadır. Kimyasal yöntemler ise seyreltme, piroliz, mikroemülsiyon oluşturma ve transesterifikasyondur [40,44].

2.7.1. Seyreltme

Seyreltme işlemi, bitkisel yağların dizel yakıtı, solvent ya da etanol gibi maddelerle karıştırılması ile gerçekleştirilir. Ayçiçek yağının dizel yakıtı ile 1/3 oranında

karıştırılması ile yapılan bir çalışmada, karışımın 40°C'deki viskozitesi 4,88 cSt olmuştur. ASTM standartlarında dizel yakıtı için belirlenen üst değer 40°C için 4 cSt'dir. Karışımın direkt püskürtmeli dizel motorlarında uzun süreli çalışmada enjektör tıkanmasına ve yapışmasına yol açtığı belirtilmiştir [26,40].

2.7.2. Piroliz

Piroliz yönteminde, moleküller yüksek sıcaklıkta daha küçük moleküllere parçalanmaktadır. Bu yöntem sayesinde viskozite azalmakta, fakat işlemler ilave masraflar gerektirmektedir. Bitkisel yağların piroliz ürünlerini elde etmek için iki yöntem vardır. Bunlardan birisi, bitkisel yağları ısı etkisiyle kapalı bir kaptaki parçalamak, diğeri ise standart ASTM distilasyonu ile bitkisel yağları ısı parçalanma etkisinde tutmaktır. Isı etkisiyle parçalanmış bitkisel yağın sıvı fraksiyonlarının özellikleri dizel yakıtıninkine daha yakındır. Schwab ve ark. [45] yaptıkları çalışmada, pirolize soya yağının % 79 karbon ve % 11,88 hidrojen içerdiğini, piroliz işlemi ile setan sayısının 37,9'dan 43'e çıkarken, 38°C'deki viskozitenin 32,6'dan 10,2 cST'ye (sınır değer 38 °C için 7,5 cSt) düştüğünü belirtmişlerdir. Ayrıca kükürt, su, tortu ve bakır çubuk korozyonu değerlerinin istenen seviyede olduğunu; fakat kül, karbon kalıntısı ve akma noktasının arzu edilen düzeyde olmadığını belirtmişlerdir. Pirolize yağ ile yapılan motor testleri kısa süreli testlerle sınırlıdır [26,41].

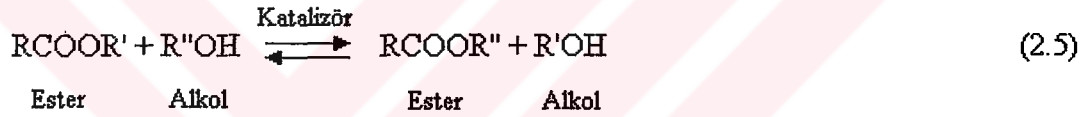
2.7.3. Mikroemülsiyon

Mikroemülsiyon oluşturma yöntemi metanol veya etanol gibi kısa zincirli alkollerle, bitkisel yağın mikroemülsiyon haline getirilme işlemidir. Böylece viskozite azalmaktadır. Mikroemülsiyon, boyutları 1-150 nm arasında olan optikçe izotropik sıvı mikro yapılarının koloidal denge dağılımı olup, normalde karışmayan iki sıvı ile bir veya daha fazla amfifilin bir araya gelmesiyle oluşur. Bu yöntemle petrolden tamamen bağımsız alternatif dizel yakıtları meydana getirilebilir. Mikroemülsiyonların hacimsel ısı değerleri, alkol içermeleri dolayısıyla motorine göre daha düşüktür. Alkollerin setan sayılarının düşük olması nedeniyle emülsiyonun setan sayısı da düşük olmakta, ayrıca düşük sıcaklıklarda karışım ayrışma eğilimi göstermektedir. Bu da motor gücünde bir miktar düşmeye yol açmaktadır. Alkollerin

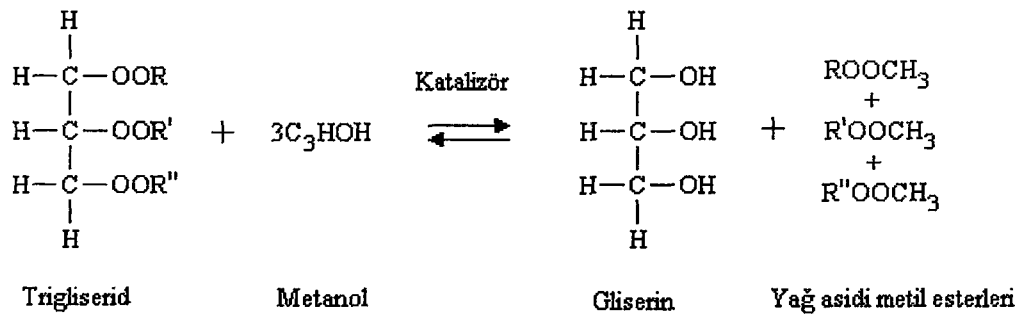
gizli buharlaşma ısılarının yüksek olması yanma odasını soğutucu etki yapmaktadır. Bu durum ise enjektör delikleri ve egzoz supapları civarındaki ağır karbon birikimini azaltıcı yönde etki yapmaktadır [26,36].

2.7.4. Transesterifikasyon

Transesterifikasyon, bitkisel yağların monohidrik bir alkolle (metanol, etanol), katalizör (asidik, bazik katalizörler ve enzimler) varlığında esas ürün olarak yağ asidi esterleri ve gliserin vererek yeniden esterleştirilmesi işlemidir. Bu yöntem viskoziteyi azaltmada en etkili yöntemdir. Reaksiyonda yan ürün olarak di- ve mono gliseridler, reaktan fazlası ve serbest yağ asitleri oluşur. Transesterifikasyon reaksiyonunun genel denklemi şu şekildedir [26];



Eğer yukarıdaki reaksiyonda metanol kullanılırsa, bu işleme metanoliz denilir. Trigliseridin metanol ile reaksiyonu Şekil 2.10'da görülmektedir. Yağ asidi metil esterleri biyodizel olarak bilinirler ve iyi bir alternatif dizel yakıtıdır.



Şekil 2.10. Bitkisel yağın metanol ile transesterifikasyonu [26].

Biyodizel üretiminde bitkisel yağ olarak kolza, ayçiçek, soya ve kullanılmış kızartma yağları, alkol olarak metanol, katalizör olarak alkali katalizörler (sodyum veya potasyum hidroksit) tercih edilmektedir. Biyodizel olarak genellikle, bitkisel

yağlardaki trigliseridlerin metanol ile transesterifikasyonu neticesinde elde edilen yağ asidi metil esterleri kastedilir. [25,26].

2.8. Biyodizelin Özellikleri ve Standartları

Çeşitli bitkisel yağlardan elde edilmiş biyodizel yakıtların özellikleri Tablo 2.4'de görülmektedir. Görüldüğü üzere biyodizelin karakteristikleri motorininkine çok yakındır. Trigliseridlerin transesterifikasyon ile metil ya da etil estere dönüştürülmeleri sonucunda, molekül ağırlıkları yaklaşık üçte iki oranında azalmakta, buna bağlı olarak viskoziteleri yaklaşık sekiz kat azalırken, uçuculukları da önemli miktarda azalmaktadır. Bu esterler yaklaşık % 10-11 oksijen içerdiklerinden yanma, HC esaslı dizel yakıtına göre daha iyi olmaktadır. Setan sayısı 50 civarındadır. Uçuculuk önemli ölçüde iyileştiğinden dolayı soğukta ilk hareket problemleri azalmaktadır. Biyodizelin hacimsel ısı değeri motorinden yaklaşık % 12 daha az olmakla birlikte, setan sayısı ve parlama noktası daha yüksektir. Ayrıca ester yakıtların dumanlanma ve akma noktaları da dizel yakıtınınkinden daha yüksektir [26].

Tablo 2.4. Biyodizelin özellikleri [27,40].

Yağ asidi metil esterleri	Yoğunluk (g/cm ³)	Kinematik viskozite(cSt)	Alt Isıl değer (kJ/kg)	Setan Sayısı (ASTM D613)	Parlama noktası (°C)
Ayçiçek	0,88	4,6	40.579	49	183
Soya	0,885	4,5	39.760	45	178
Fıstık	0,883	4,9	33.600	54	176
Motorin	0,86	2,9	42.450	50,8	55

Biyodizel, çok çeşitli kaynaklardan farklı yöntemler kullanılarak üretilbildiğinden, yakıt özellikleri ve kalitesi de farklı olmaktadır. Bu ise biyodizel üretiminde standart özelliklerin belirlenmesini veya sınır değerlere uyup uymadığının kontrol edilmesini zorunlu kılmaktadır. Tablo 2.5'de değişik ülkelere göre biyodizel standart özelliklerinden bazıları karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Biyodizel için Avusturya'da ÖN C 1190, Almanya ve diğer Avrupa ülkelerinde DIN V 51 606 standartları kullanılmakta olup, Amerika'da standart özellikleri ASTM tarafından

Tablo 2.5. Çeşitli ülkelerde uygulanan biyodizel standartları [41,46].

	Birim	Avusturya	Fransa	Almanya	İtalya	ABD
Standart / Özellikler		ÖN C 1191		DIN E 51606	UNI 10635	ASTM PS121-99
Tarih		1997	1997	1997	1997	1999
Uygulama		YAME	BYME	YAME	BYME	YAMAE
Yoğunluk (15°C)	g/cm ³	0,85-0,89	0,87-0,90	0,875-0,90	0,86-0,90	-
Viskozite (40°C)	cSt	3,5-5	3,5-5	3,5-5	3,5-5	1,9-6
Damıtma (% 95)	°C	-	≤ 360	-	≤ 360	-
Parlama Noktası	°C	≥ 100	≥ 100	≥ 110	≥ 100	≥ 100
Akma Noktası	°C	-	< -10	-	-	-
Kükürt	% kütle	≤ 0,02	-	≤ 0,01	≤ 0,01	≤ 0,05
Kül	% kütle	-	-	-	≤ 0,01	-
Su	mg/kg	-	≤ 200	≤ 300	≤ 700	≤ % 0,05
Bakır korozyonu	3h/50 °C	-	-	1	-	≤ No.3
Setan sayısı	-	≥ 49	≥ 49	≥ 49	-	≥ 40
Asit sayısı	MgKOH/g	≤ 0,8	≤ 0,5	≤ 0,5	≤ 0,5	≤ 0,8
Metanol içeriği	% kütle	≤ 0,20	≤ 0,1	≤ 0,3	≤ 0,2	-
Ester içeriği	% kütle	-	≥ 96,5	-	≥ 98	-
Monoglisericid	% kütle	-	≤ 0,8	≤ 0,8	≤ 0,8	-
Diglisericid	% kütle	-	≤ 0,2	≤ 0,4	≤ 0,2	-
Triglisericid	% kütle	-	≤ 0,2	≤ 0,4	≤ 0,1	-
Serbest gliserol	% kütle	≤ 0,02	≤ 0,02	≤ 0,02	≤ 0,05	≤ 0,02
Toplam gliserol	% kütle	≤ 0,24	≤ 0,25	≤ 0,25	-	≤ 0,24
İyot sayısı	-	≤ 120	≤ 115	≤ 115	-	-
Fosfor içeriği	mg/kg	≤ 20	≤ 10	≤ 10	≤ 10	-
Alkalin (Na,K)	mg/kg	-	≤ 5	≤ 5	-	-

belirlenmektedir. Bu standartlar büyük dizel motor üreticileri Audi, Ford, Iveco, John Deere, Kubota, Man, Mercedes-Benz, Seat, Skoda, Volkswagen vb. tarafından esas kabul edilmektedir. Almanya, Fransa, Avusturya, İtalya, İsveç ve ABD, biyodizel için üretim yöntem ve parametrelerini, metil veya etil ester yakıt değerini ve yakıt özelliklerini belirlemişlerdir. Bu çalışmalarını birleştirerek ön standartlarını hazırlamışlardır [41,47].

2.9. Dizel Yakıtı Olarak Biyodizelin Performansı ve Yanma Denklemi

HC esaslı dizel yakıtları ile karşılaştırıldığında, biyodizelin yüksek setan sayısı, tutuşma gecikmesini kısaltmakta ve yanma süresini uzatmaktadır, dolayısıyla partikül emisyonları azalmaktadır. Biyodizel egzozundaki kötü koku daha azdır. Biyodizel kullanılmasıyla enjektör deliklerindeki karbon birikintisi daha az olmaktadır. Rao ve ark.[43] şayet motor uzun süre biyodizel ile çalışacaksa daha iyi bir ısı verim için, püskürtme avansının yeniden ayarlanması gerektiğini belirtmişlerdir. Biyodizelin ısı değerinin dizel yakıtına göre düşük olması, özgül yakıt tüketimini artırıcı yönde etki yapmaktadır. Biyodizel, HC esaslı dizel yakıtları ile karıştırılarak da kullanılmaktadır. En çok tercih edilen oran dizel yakıtına % 20 biyodizel katılmasıdır. Pek çok araştırma göstermiştir ki; dizel/biyodizel karışımları duman koyuluğunu, partikülleri, yanmamış HC, CO₂ ve CO emisyonlarını azaltmış, fakat NO_x emisyonlarını artırmıştır. Biyodizelin dezavantajlarından birisi de kış şartlarında (0°C'nin altı) kristalize olması ve dizel yakıtından ayrışmasıdır. Bu kristaller yakıt borularını ve filtrelerini tıkayabilir, yakıtın pompalanmasında ve motorun çalışmasında sorun çıkarabilirler. Bu sorun izopropil ester gibi dallanmış zincir yapıdaki esterlerin kullanılması ya da vinterizasyon (kademeli olarak soğutulan ve düşük sıcaklıklarda yavaş bir karıştırma eşliğinde bekletilen yağda oluşan kristallerin süzülerek uzaklaştırılması işlemi) ile çözülebilir. Ayrıca uzun süreli depolamada biyodizelin yakıt özelliklerinin değişmesine yol açmaktadır [26,48,49].

Bitkisel yağlardan üretilen biyodizelin formülünün, HC esaslı dizel yakıtlarınınkinden farklı olması teorik tam yanma için gereken hava/yakıt oranının değişmesine yol açmaktadır. Daha iyi bir değerlendirme yapılabilmesi için bu oranın

hesaplanması gerekir. Tablo 2.6'da bazı bitkisel yağ ve bitkisel yağ esterlerinin gaz kromatografisi ile belirlenen yağ asitleri yüzdesi dikkate alınarak hesaplanan kimyasal formülleri görülmektedir.

Tablo 2.6. Bazı bitkisel yağların kimyasal formülleri [27].

Bitkisel Yağ	Kimyasal Formül	Yaklaşık Kimyasal Formül
Ham soya	$C_{56,2972}H_{102,4294}O_6$	$C_{56}H_{102}O_6$
Ham pamuk	$C_{55,3341}H_{102,4012}O_6$	$C_{55}H_{102}O_6$
Ham mısır	$C_{56,1227}H_{103,3569}O_6$	$C_{56}H_{103}O_6$
Soya metil esteri	$C_{53,3363}H_{100,6104}O_6$	$C_{53}H_{101}O_6$
Ayçiçek metil esteri	$C_{53,5881}H_{100,6104}O_6$	$C_{54}H_{101}O_6$

Ayçiçek metil esterinin teorik tam yanma denklemi;



teorik tam yanma için hava/yakıt kütle oranı;

$$\frac{H}{Y} = \frac{[(76,25 \times 32) + (286,7 \times 28)]}{[(54 \times 12) + (101 \times 1) + (16 \times 6)]} = \frac{10467,6}{845} = \frac{12,38}{1}$$

$$\frac{H}{Y} = \frac{12,38}{1} = \text{kg hava / kg yakıt}$$

olarak belirlenir. Dizel yakıtının hava/yakıt kütle oranının yaklaşık 14,9/1 olduğunu dikkate alırsak; stokiyometrik oranda yakıt gönderilmesi durumunda, 1 kg hava ile değerlendirilebilecek enerji miktarı, dizel yakıtı kullanıldığında 3,015 kJ, ayçiçek yağı kullanıldığında ise 3,089 kJ kadar olacaktır. Başka açıdan şu değerlendirme yapılabilir; dizel motorlarında motora olan hava akışı kontrol edilmemekte, yakıt kontrolü ise hacimsel olarak yapılmaktadır. Ayçiçek metil esterinin yoğunluğunun fazla olması sebebiyle, aynı hızdaki çalışma sırasında aynı hacimsel miktarda yakıt gönderilmesi durumunda, sisteme verilecek enerji dizel yakıtı ile 36.675 kJ/l, ayçiçek metil esteri ile 36.720 kJ/l kadar olacaktır. Kütleli olarak daha fazla ayçiçek metil

esteri kullanılabilir olması ayçiçek metil esterinin ısı değerindeki düşüklük sebebiyle motora verilecek enerji miktarındaki azalmayı telafi edici bir özelliktir [27].

2.10. Kaynak Araştırması

Modern dizel motorlarının çoğunda direkt püskürtmeli yakıt sistemleri mevcuttur. Bu motorlar yakıt demetinin kalitesine karşı endirekt püskürtmeli motorlara göre daha hassastırlar. Dolayısıyla kullanılacak yakıtın özelliklerinin mümkün olduğunca dizel yakıtıninkine yakın olması istenir [50]. Bitkisel yağların başlangıçta tek başlarına, sonra seyreltme tekniği ile, daha sonra da esterleştirme ile yakıt özelliklerinin geliştirilerek dizel motorlarında kullanılmasına yönelik pek çok çalışma yapılmıştır.

Bitkisel yağlarla ilgili yapılan birçok araştırmada, uzun süreli çalışma neticesinde yanma odasında özellikle enjektör memesinde karbon birikimi olduğu gözlenmiştir. Yakıt atomizasyonunun azalması sonucu yanma veriminin düşmesi, yağlama yağının katılaşması, segman yapışması gibi sorunların ortaya çıktığı ve bu sorunlara karşı tedbir alınması gerektiği belirtilmektedir [32].

Vellguth [50] direkt püskürtmeli bir dizel motorunda kolza yağını rafine ve metil ester şeklinde denemiş, uzun süreli çalışmada motor elemanlarında çeşitli arızalar olduğunu belirtmiştir. Kolza metil esteri kullanıldığında, rafine kolza yağına göre yanma odasında daha az karbon birikintisi olduğunu tespit etmişlerdir.

Karaosmanoğlu ve ark. [51] kullanılmış kızartma yağının viskozitesini seyreltme tekniği ile düşürerek elde edilen farklı karışımların fiziksel özelliklerini incelemişlerdir. Buna göre % 40'a kadar karışımların dizel yakıtı yerine kullanılabileceğini belirtmiştir.

Oğuz ve ark. [52] ayçiçek yağının viskozitesini seyreltme yöntemi ile düşürerek maksimum gücü 43 kW olan, doğal emişli, üç silindirli bir motorda yakıt olarak kullanmışlardır. Deneyler sonucunda motor performansında önemi bir değişme olmadığını, özgül yakıt tüketiminde % 15'lik bir kötüleşme olduğunu ve duman emisyonlarında azalma olduğunu belirtmişlerdir.

Yücesu ve ark. [53] tek silindirli, direkt püskürtmeli bir dizel motorunda kanola, mısır, haşhaş yağlarını ham şekilde, ayçiçek, pamuk ve soya yağlarını ham ve metil ester şeklinde denemişlerdir. Yapılan testlerde; esterleştirme ile ham yağların özelliklerinde iyileşme görülmüş (viskozite ve yoğunluk azalırken, ısıl değer bir miktar artmış). Ayrıca bitkisel yağlarla yapılan çalışmada ilk harekete geçişte zorluklar meydana gelmiştir. Bitkisel yağ kullanımı ile dizel yakıtına göre motor momenti (% 2-6), gücü (% 4-7,3) ve efektif veriminde (% 1-9) az da olsa düşüşlerin meydana geldiği, yağ asidi metil esterleri kullanımı ile moment, güç ve termik verimin ham bitkisel yağlara oranla daha yüksek olduğu ve dizel yakıtına daha yakın olduğu tespit edilmiştir. Bitkisel yağlar ile yapılan testlerde duman koyuluğu dizel yakıtına göre daha yüksek olurken (% 37-74), yağ asidi metil esterleri kullanımı ile duman koyuluğu, ham bitkisel yağlara oranla daha düşük olmuştur. Bitkisel yağ kullanıldığında NO_x emisyonları azalmış (ortalama % 22), yağ asidi metil esterleri kullanıldığında ham bitkisel yağlara oranla NO_x emisyonlarının kısmen arttığını belirtmişlerdir.

Antolin ve ark. [54] ayçiçek yağından ürettikleri biyodizeli direkt püskürtmeli bir dizel motorunda denemişlerdir. Kısa ve uzun süreli test sonuçları biyodizelin mevcut motorda fazla değişiklik yapılmadan kullanılabileceğini göstermiştir. Biyodizelin ısıl değerinin dizel yakıtına göre % 12 daha az olmakla birlikte, bunun yüksek yoğunluk ile dengeleneceğini, böylece toplam kaybın % 6'dan daha az olacağını belirtmişlerdir. Ayrıca biyodizel kullanımında CO, HC, NO_x , ve CO_2 emisyonlarının dizel yakıtına göre daha düşük ya da aynı seviyede olduğunu, duman emisyonunun ise daha düşük olduğunu tespit etmişlerdir. Bunlara ilaveten biyodizel üretimindeki optimum şartları belirlemeye çalışmışlar, transesterifikasyon için stokiyometrik miktarın üç katı metanol, esterleştirilecek yağ miktarının ağırlıkça % 0,28'i kadar KOH katalizör ve 70 °C reaksiyon sıcaklığında % 94 verime ulaştıklarını belirtmişlerdir.

Oğuz [55] maksimum gücü 60 kW, maksimum döndürme momenti 265 Nm, sıkıştırma oranı 17/1 olan, doğal emişli, dört silindirli, direkt püskürtmeli bir dizel motorunda fındık yağı metil esterini tam yük şartlarında denemiştir. Biyodizel kullanılması ile maksimum döndürme momentinde % 9,3 azalma olurken motor gücü hemen hemen aynı kalmış, özgül yakıt tüketimi % 10,2 artmıştır. Toplam verim dizel

yakıtı için % 35,8 olurken, biyodizel için % 33,4 olmuştur. Duman emisyonu ortalama % 43,5 azalmış, CO emisyonu düşük ve yüksek hızlarda azalmasına rağmen, orta hızlarda artmıştır. CO₂ emisyonu ortalama % 10,64 azalmış, yanmamış HC emisyonları beş kat artış göstermiştir.

Altın ve ark.[56] tek silindirli, dört zamanlı, doğal emişli bir dizel motorunda dizel yakıtı ve ayçiçek metil esterini tam yük şartlarında denemiştir. Deneyler sonucunda biyodizel kullanılması ile dizel yakıtına göre efektif döndürme momenti % 6 ila 7, efektif güç % 1-7 azalırken, özgül yakıt tüketimi % 8-13, özgül enerji maliyeti % 43-100 oranlarında artmıştır. Biyodizel emisyonlarının ise dizel yakıtı ile hemen hemen aynı seviyede olduğunu belirtmişlerdir.

Yahya [57] maksimum gücü 56 kW ve sıkıştırma oranı 17,2/1 olan dört silindirli bir dizel motorunda değişik püskürtme avansı ve basınçlarında soya ve tallow metil esterini yakıt olarak denemiştir. Aynı püskürtme avansında basıncın artmasıyla yakıt tüketiminin % 6,4 ila 7 arasında azaldığını belirtmiştir. Ayrıca düşük hızlarda her iki yakıt için efektif gücün % 5,6 ila 8 daha fazla olduğunu tespit etmiştir.

Dorado ve ark. [21] maksimum gücü 34 kW, maksimum döndürme momenti 162,8 Nm olan 2,5 litrelik, üç silindirli, direkt püskürtmeli bir dizel motorunda atık zeytin yağından ürettikleri biyodizeli Mod 8 çevrimine göre test etmişlerdir. Biyodizel kullanılmasıyla CO emisyonlarında % 58,9, CO₂ emisyonlarında % 8,6 ve SO₂ emisyonlarında % 57,7'ye varan iyileşmeler sağlanırken, NO_x emisyonları % 32 kötüleşmiştir. Ayrıca fren özgül yakıt tüketiminde % 8,5'e varan kötüleşmeler olmuş; fakat bunun emisyonlardaki iyileşme ile tolere edilebileceğini belirtmişlerdir.

İçingür ve ark. [1] tek silindirli, doğal emişli bir dizel motorunda ayçiçek metil ve etil esterini tam yük şartlarında denemişler ve deney sonuçlarını dizel yakıtı ile karşılaştırmışlardır. Metil ve etil ester için maksimum momentler sırasıyla % 6 ve % 8 daha düşük çıkmaktadır. Motor gücü metil ester de % 9, etil ester de % 14 daha azdır. Özgül yakıt tüketimi metil ve etil ester için sırasıyla % 54,5 ve % 187 daha fazla olmaktadır. NO_x emisyonu açısından metil ester % 12, etil ester % 24 daha

düşüktür. Duman emisyonu metil ester için % 10 etil ester için % 21 daha fazla olduğunu belirtmişlerdir.

Da Silva ve ark. [58] maksimum gücü 180 kW, maksimum döndürme momenti 900 Nm olan 6 silindirli, turbo aşırı doldurmalı, 9,6 litrelik bir dizel motorunda ayçiçek metil esterini dizel yakıtına hacimsel olarak % 5 ve 30 oranlarında karıştırıp denemişlerdir. Deneyler sonucunda motor performansı ve özgül yakıt tüketiminde önemli bir kötüleşme olmadığını, % 30 biyodizel ilavesi ile duman emisyonunun azaldığını tespit etmişlerdir. Dizel yakıtına ayçiçek metil esteri katılmasıyla yüksek motor yüklerinde CO emisyonunun azaldığını, ve NO_x emisyonlarının ise dizel yakıtı kullanıldığı duruma göre pek değişmediğini belirtmişlerdir.

Monyem ve ark. [24] dört silindirli, turbo aşırı doldurmalı, direkt püskürtmeli bir dizel motorunda soya metil esterini saf olarak ve % 20 oranında dizel yakıtı ile karıştırıp tam yükte ve tam yükün % 20'sinde denemişlerdir. Deneyler sonucunda, biyodizel ve biyodizel/dizel yakıtı karışımlarının ısı verimlerinin dizel yakıtıninkine yakın olduğunu, fakat enerji yoğunluğu az olduğundan (% 12,7) yakıt tüketimlerinin fazla (% 13,8) olduğunu belirtmişlerdir. Biyodizel kullanılması ile CO emisyonları düşük yüklerde % 13, tam yükte % 29 azalmıştır. Ayrıca hafif yüklerde yanmamış HC emisyonları % 33 azalmış; tam yükte duman emisyonları % 57 azalırken, NO_x emisyonları % 14 artmıştır.

Schumacher ve ark. [15] soya metil esterini (SME) % 10, 20, 30, 40, 50 oranında No 2 dizel yakıtı ile karıştırarak altı adet traktör motorunda test etmişlerdir. Yapılan testlerde yakıt içerisinde soya metil esteri miktarının artmasıyla, CO, HC ve duman emisyonlarında azalma, NO_x emisyonlarında artış, motor momenti ve gücünde azalma ile yakıt tüketiminde artış olduğunu belirtmişlerdir.

Çanakçı ve ark. [59] soya metil esterini saf olarak ve dizel yakıtı ile % 20 oranında karıştırarak maksimum gücü 57 kW, maksimum torku 305 Nm olan dört silindirli, turboşarj bir dizel motorunda tam yük şartlarında denemişlerdir. Deneyler sonucunda, biyodizel ve biyodizel karışımlarının ısı verimleri No.2 dizel yakıtına çok yakın çıkmıştır. Biyodizelin fren özgül yakıt tüketimi dizel yakıtına göre

yaklaşık % 14 daha fazla çıkmıştır. Bunun sebebinin ise biyodizelin ısı veriminin dizel yakıtına göre yaklaşık % 12 daha az olmasından kaynaklandığını belirtmişlerdir. Biyodizel kullanılması ile duman emisyonları yaklaşık % 60, CO emisyonları yaklaşık % 20 ve yanmamış HC emisyonları yaklaşık % 45 azalırken, CO₂ emisyonları yaklaşık % 2 ve NO_x emisyonları yaklaşık % 13 artmıştır.

Bünger ve ark. [60] dizel emisyonlarının çevre ve insan sağlığına etkileri üzerine yaptıkları çalışmada kolza yağından üretilen biyodizel ve HC esaslı dizel yakıtını araştırmışlar, canlılar üzerindeki mutojenik ve kanserojenik etkilerini incelemişlerdir. Araştırma sonucunda biyodizelin HC kökenli dizel yakıtına göre yarı yarıya daha az mutojenik ve kanserojenik olduğunu ortaya koymuşlardır.

Mittelbach ve ark. [61] ester yakıtların dizel egzoz emisyonlarına etkisini incelemek amacıyla atık kızartma yağlarından metil ester üretmişlerdir. Ester yakıt kullanılması ile HC, CO ve partikül madde emisyonları azalmış, NO_x emisyonları ise artmıştır. No.2 dizel yakıtına göre, ester yakıtın ısı değerinin düşük olması yüzünden yakıt tüketiminin fazla olduğunu belirtmişlerdir.

Zhang ve ark. [62] dört değişik katalizör kullanarak ürettikleri biyodizelin maliyet analizini yapmışlar ve hesaplamalar sonucunda bazı katalizör kullanıldığında biyodizel üretim maliyetinin 0,59 \$/litre olduğunu ortaya koymuşlardır. Ayrıca biyodizel üretiminde en büyük payın % 75 ila 95 ile ham madde fiyatına bağlı olduğunu, maliyetin düşürülmesi için kullanılmış yağların değerlendirilmesi gerektiğini belirtmişlerdir.

Lang ve ark. [63] ayçiçek, kanola ve keten tohumu yağlarından farklı katalizör (NaOH, KOH) ve alkoller (metanol, etanol, 2-propanol ve bütanol) kullanarak biyodizel üretmişlerdir. Yakıt özelliklerini sıvı kromatografi ile belirlemişlerdir. Yapılan analiz sonucunda; etil, 2-propil ve bütül ester üretiminde NaOH katalizörün daha verimli olduğunu, aynı yağın etil esterinin fiziksel ve yakıt özelliklerinin metil esterinki ile karşılaştırılabilir seviyede olduğunu, 2-bütül esterinin soğuk akış özelliklerinin metil ve etil ester göre daha iyi olduğunu, bitkisel yağların ısı değerinin dizel yakıtınkinden yaklaşık % 4-9 daha az olduğunu, ester yakıtların

uçuculuğunun düşük olduğunu, 350°C’de bile biyodizelin bir kısmının buharlaşmadan kaldığını, bunun ise enjektöre yapışarak tıkanmaya sebep olabileceğini belirtmişlerdir.



BÖLÜM 3. DÜŞÜK ISI KAYIPLI MOTORLAR

Yakıt fiyatlarının hızlı artışı, kaliteli yakıt kaynaklarının azalması ve çevresel zorunluluklar daha temiz ve daha verimli çalışan motorlar üzerindeki araştırmalara olan ilgiyi artırmaktadır. Bu amaçları gerçekleştirmede kullanılacak yöntemlerden birisi de termal bariyer kaplama işlemidir. Termal bariyer kaplama ile yanma odasından iletilen ısının azaltılması, kullanılabilir enerjinin artmasını sağlamaktadır. Bu ise silindir içi işini ve egzoz gazlarındaki kullanılabilir enerji miktarını artırmaktadır [64]. Termal bariyer uygulaması için yanma odasının tamamı ya da bir kısmı ısı iletim katsayısı düşük olan, yüksek sıcaklığa dayanıklı malzeme ile kaplanarak, soğutma suyuna geçen ısı miktarı azaltılmaktadır. Bu işlemin uygulandığı motorlara “Düşük Isı Kayıplı Motor” denildiği gibi, “Adyabatik Motor” veya “Seramik Kaplı Motor” terimleri de kullanılmaktadır.

Dizel motorlarında termal bariyer kaplama uygulamalarının üstünlükleri şöyle sıralanabilir [65];

- Yakıt tasarrufu, en fazla % 11
- Daha uzun motor ömrü, en fazla % 20
- Motor gücünde artış, en fazla % 10
- Emisyonlarda azalma, % 20 ila 50
- Partiküllerde azalma, en fazla %52
- Duman koyuluğunda azalma, en fazla % 75
- Yağlama yağı tasarrufu, en fazla % 15
- Düşük setan sayılı yakıt kullanabilme imkanı, 35 ila 45
- Motor sesinde azalma, en fazla 3 desibel
- Soğukta ilk harekette iyileşme
- Parça sıcaklıklarında yaklaşık 100°C azalma

- Egzoz supabı ömründe artış, en fazla % 300
- Bakım maliyetlerinde azalma, en fazla % 20
- Tutuşma gecikmesinde azalma, en fazla 3° KMA

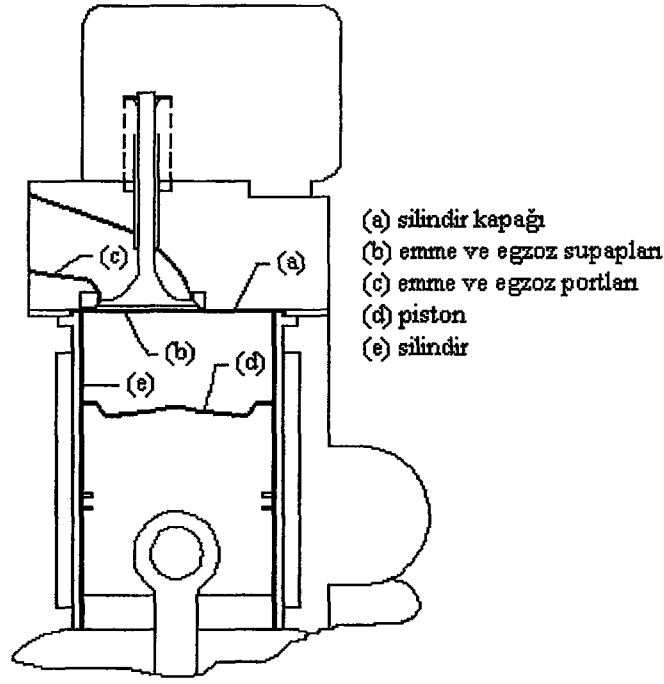
İçten yanmalı motorlarda tüketilen yakıtın enerjisi esas olarak dört ana gruba ayrılmaktadır:

- Faydalı işe dönüşen enerji,
- Soğutma yoluyla kaybedilen enerji,
- Egzoz gazıyla kaybedilen enerji,
- Sürtünme yoluyla kaybedilen enerji.

Soğutma yoluyla kaybedilen ısının azaltılmasıyla termodinamiğin birinci kanununa göre potansiyel olarak daha fazla iş elde edilmesi söz konusudur. Ayrıca parazitik (fan, devir-daim pompası vb) kayıpların ortadan kalkmasıyla, motor gücünde artma meydana gelmektedir. Yüksek gaz sıcaklıkları çok çeşitli ve daha az kaliteli yakıt kullanılmasına imkan verecektir. Soğutma sistemine iletilen ısının azalması sonucunda soğutma sistemi küçülecek, veya ortadan kalkacaktır. Bu ise motor tasarımını kolaylaştırmakta ve bakım kolaylığı sağlamaktadır. Artan gaz sıcaklıkları ve tutuşma gecikmesinin kısılmasıyla CO, yanmamış HC ve duman gibi eksik yanma ürünlerinin azalmasına karşın, NO_x'lerde artış olmaktadır [66-68].

3.1. Adyabatik Motor

Termodinamikte adyabatik terimi enerji dengesine göre; dış ortam ile ısı alışverişini olmayan yalıtılmış sistemler kastedilmektedir. Termodinamiğin 1. kanununa göre adyabatik sistemin yaptığı iş, sistemin enerjisindeki toplam değişime eşit olmaktadır. İçten yanmalı motorlarda sistem motorun kendisidir. Yakıt enerjisiyle motora, iş yaptırılmaktadır. Teoride adyabatik motorun ısı kaybı sıfır olmasına rağmen, uygulamada tam adyabatik bir motor yapılması imkansızdır. En ideal şartlarda bile ancak % 50-60'lık bir adyabatiklik sağlanabilir. Bu yüzden bu motorlar daha uygun bir ifade ile "Düşük Isı Kayıplı (DIK)" motorlar olarak isimlendirilirler [69]. Düşük ısı kayıplı bir motorun yalıtılan parçaları; silindir kapağı, supaplar, supap yuvaları, piston ve silindiridir.



Şekil 3.1. Düşük ısı kayıplı bir motorun yalıtılmış parçaları [70].

Yalıtım malzemesi olarak genelde, ısı iletim katsayısı düşük olan seramik malzemeler kullanılmaktadır. DIK motorlarda egzoz gazlarının izolasyon neticesinde artan enerjisinden faydalanabilmek için aşırı doldurma uygulanması ile motor performansı daha da geliştirilerek, özgül yakıt tüketimi azaltılabilir [69,70].

3.2. İleri Teknoloji Seramikleri

DIK motor tasarımında neredeyse başlangıçtan itibaren seramikler kullanılmaktadır. Bu malzemelerin, standart motorlarda kullanılan metallere göre ağırlığı az ve ısı iletim katsayısı (k) daha düşüktür [71]. Günümüzde klasik seramiklerin üretiminde miktar ve kalite bakımından önemli gelişmeler kaydedilmiştir. Ayrıca son yarım yüzyılda yeni seramikler geliştirilmiş olup, bunlar “İleri Teknoloji Seramikleri” olarak isimlendirilmektedirler. İleri teknoloji seramiklerinin üstünlükleri şu şekilde sıralanabilir;

- Yüksek sıcaklığa dayanıklı olmaları,
- Kimyasal kararlılıklarının yüksek olması,
- Çok sert olmaları,

- Yoğunluklarının düşük olması,
- Tabiatta ham madde olarak bol miktarda bulunmaları,
- Aşınmaya karşı dayanıklı olmaları,
- Isı iletim katsayılarının düşük olması,
- Basma mukavemetlerinin yüksek olması [72].

İleri teknoloji seramikleri başlıca Alümina (Al_2O_3), Zirkonya (ZrO_2), Magnezya (MgO), Berilya (BeO) gibi saf oksitlerden ve oksit olmayan seramiklerden oluşmaktadır. Bazı ileri teknoloji seramiklerinin özellikleri Tablo 3.1’de verilmiştir.

Tablo 3.1. Bazı ileri teknoloji seramiklerinin özellikleri [72].

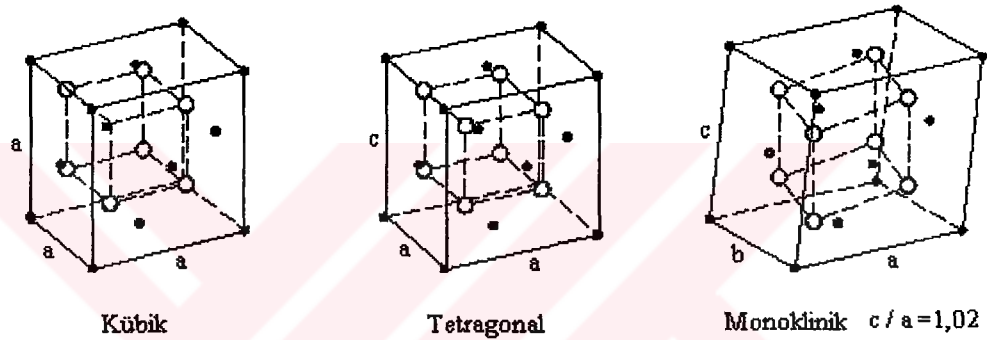
Malzeme	Ergime Sıcaklığı (°C)	Yoğunluk (g/cm^3)	Mukavemet (MPa)	E (GPa)	K_c ($MPa m^{1/2}$)	Sertlik (kg/mm^2)
Cam	500	2,2	48	7,2	0,5	650
Al_2O_3	2050	3,96	250-300	36-40	4,5	1300
ZrO_2	2700	5,6	113-130	17-25	6-9	1200
SiC	3000	3,2	310	40-44	3,4	2800
Si_3N_4	1900	3,24	410	30,70	5	1300

Seramik kaplama malzemesi olarak zirkonya, kullanım yerleri ve kendine has özellikleri ile oldukça önemli bir yere sahiptir. Zirkonyanın en önemli özelliği, yüksek sıcaklıklarda kullanılabilmesidir. Zirkonya içeren seramiklerin ergime noktaları yüksektir ve ısı şoklarına dayanıklıdır. Ayrıca iyi bir korozyon ve erozyon direncine sahiptirler. Dizel motorlarında ve türbin kanatçıklarında ısı geçişini engellemek amacıyla da kullanılmaktadır. Zirkonya içeren seramiklerin içten yanmalı motorlarda kullanılmasına yönelik araştırmalar devam etmektedir. Bu konuda yapılan yoğun araştırmalar sonucunda yakın bir gelecekte, içten yanmalı motorlarda kullanılan klasik mühendislik malzemeleri yerlerini, zirkonya içeren seramik malzemelere bırakacağına benzemektedir [73,74].

3.2.1. Zirkonya (ZrO_2)

Zirkonya, Şekil 3.2’de görüldüğü gibi üç farklı kristal yapıda bulunur. Bunlar monoklinik (m), tetragonal (t) ve kübik (k) yapıdır. Monoklinik yapı, oda

sıcaklığından 1170°C'ye kadar kararlı olup bu sıcaklığın üzerinde yapı tetragonal yapıya dönüşür. Tetragonal yapı da 2370°C'ye kadar kararlıdır. Bu sıcaklığın üzerinde yapı kübiktir. Monoklinik yapıdan, tetragonal yapıya geçiş % 8 civarında hacim değişikliği içerdiğinden bu faz dönüşümü sonucu seramik malzeme genellikle parçalanmaktadır. Bu durumu önlemek ve yapıyı oda sıcaklığında kübik yapıda kararlı kılmak amacıyla zirkonyaya CaO (kalsiyum oksit), MgO (magnezya), Y₂O₃ (yitriya) gibi toprak alkali ve nadir elementlerin oksitleri katılır. Y₂O₃ ile stabilize edilmiş zirkonya esaslı seramik malzemeler CaO ve MgO ile stabilize edilen malzemelere göre çok daha üstün özelliklere sahiptir [73,74].



Şekil 3.2. Kübik, tetragonal ve monoklinik zirkonya [73].

Kübik yapıdaki zirkonyanın mekanik özellikleri zayıftır. Tetragonal zirkonyadan monoklinik zirkonyaya dönüşüm ise 850-1000°C gibi daha düşük sıcaklıkta yer alır ve bu dönüşüm su verilmiş çeliklerde görülen martenzitik dönüşüm karakteristiklerine sahiptir. Zirkonyada yer alan martenzitik dönüşümün önemi ve mekanik özelliklerinin geliştirilmesi nedeniyle, tamamen kararlı kübik yapı yerine, içerisinde çökelti halinde monoklinik veya tetragonal faz içeren kısmen stabilize edilmiş zirkonya (KSZ) tercih edilmektedir. KSZ seramikler 1970'den beri ticari olarak sınıflandırılmışlardır. Tablo 3.2'de KSZ seramiklerin çeşitleri ve özellikleri görülmektedir. Bu malzemelerin yapısal özellikleri;

- Zt35: Kübik matriks içinde % 20 (t) fazı içerir. Tane boyutu, 60-70 µm mertebesindedir.
- ZN40: % 40-50 (t) fazı içerir.
- ZN50: Tane boyutu tipik olarak 60-70 µm'dir ve tane sınırlarında ince bir film halinde (m) fazı yer almaktadır.

- ZN100: Tane boyutu çok ince ($\sim 0,3 \mu\text{m}$) olup % 100 (t) fazı içermektedir.
- ZN20: Termal şok için geliştirilmiştir. (m) fazı içerir.

Tablo 3.2. KSZ seramikler ve özellikleri [73].

Malzeme	Kodu	E (GPa)	K_c (MPa m ^{1/2})	HV (22°C)	Genleşme katsayısı (22°C -1000°C)
Ca/Mg-KSZ	Zt 35	200	4,8	1300	$9,8 \times 10^{-6}$
Mg-KSZ	ZN40	200	8,1	1200	9,8
Mg-KSZ	ZN50	200	9	900	7
Y-KSZ	ZN100	190	9,7	-	9,3
Mg-KSZ	ZN20	180	3,5	-	5,5

3.2.2. Yitriya (Y₂O₃)

Yitriyanın (Y₂O₃) ergime noktası 2410°C'dir. Havada oldukça kararlı olup kolayca indirgenmez. Asitlerde çözünebilir ve CO₂'i absorbe eder. Nerst lambalarında filaman olarak, zirkonya ve torya ile az miktarda alaşım halinde kullanılmaktadır. Zirkonyaya ilave edildiğinde yapısını kübik yapıda kararlı kılar. Başlıca yitriya mineralleri; gadolinit, xenotim ve fergusonittir. Yapısı kübik olup, son derece refrakterdir ve çoğu ortamda kimyasal olarak kararlıdır.

3.2.3. Magnezya (MgO)

Magnezyanın (MgO) ergime noktası 2800°C olup, refrakter oksitlerin içerisinde en bol bulunanıdır. Termal genleşmesi çok yüksektir. Yüksek sıcaklıklarda kolayca indirgenebilir ve 2300-2400°C sıcaklıkta buharlaşır. Yüksek sıcaklıklarda yoğun magnezyanın, mineral asitlerine, asit gazlara, nötr tuzlara ve rutubete karşı direnci yüksektir. 1800 °C'ye kadar, karbonla temas halinde kararlıdır. 2000°C'nin üstünde karbon ve karbürler ile hızla reaksiyona girmektedir. En önemli mineralleri; manyezit, talk, asbest, dolomit ve spineldir.

3.2.4. Alümina (Al_2O_3)

Alüminanın ergime noktası $2000^{\circ}C$ civarındadır. Orta sıcaklıklarda mekanik yüklere ve kimyasal maddelere karşı en dayanıklı refrakter malzemelerdendir. Nispeten düşük ergime noktası, kullanımını sınırlandırmaktadır. Suda ve iyi kalsine edildiği takdirde mineral asitlerinde ve bazlarda çözünmez. Doğal alümina, korundum halinde, silikatlarla birlikte bulunduğu gibi boksit, diaspor, kriyolit, silimanit, kyanit, nefelit ve diğer birçok mineralin bileşiminde yer almaktadır. Saflığı arttıkça sıcağa dayanım, elektrik ve aşınma direncinde de artış olmaktadır.

3.2.5. Berilya

Ergime noktası $2550^{\circ}C$ olup, termal karalılığı ve redüksiyona karşı direnci çok fazladır. Yüksek sıcaklıklarda karbon ile indirgenmeye karşı en dirençli oksittir. Isıl iletkenliği çok yüksek olmasına rağmen elektrik iletkenliği çok düşüktür. $1600^{\circ}C$ 'ye kadar mekanik özellikleri oldukça sabit kalır ve bu sıcaklıktaki basma dayanımı en yüksek oksitlerden birisidir. Berilyum oksidin önemli bir kısmı beril mineralinden sağlanır. Yüksek sıcaklıkta kimyasal maddelere karşı direnci yüksek olduğundan ergimiş metaller için iyi bir refrakter malzemedir [73].

3.3. İçten Yanmalı Motorlarda Termal Bariyer Kaplama Uygulamaları

Isı geçişini engellemek amacıyla yapılan kaplamalar ince ve kalın olmak üzere iki gruba ayrılmaktadırlar. Genelde, $0,5\text{ mm}$ 'ye kadar olan kaplamalar ince, $5-6\text{ mm}$ 'ye kadar olanlar ise, kalın kaplamalar olarak isimlendirilmektedir. İnce termal bariyer kaplamalar (TBK) gaz türbinlerinde, otto ve dizel motorlarının piston tepesi, silindir kapağı ve supapların kaplanması için kullanılır. DIK motorların ilk uygulamalarında genellikle motor parçalarına kalın monoklinik seramik kaplaması yapılmıştır. Daha sonraları mevcut monoklinik seramiklerin dizel motorlarının çalışma şartlarına pek uygun olmadığı anlaşılmıştır. Bu yüzden TBK uygulamaları için yeni yaklaşımlar geliştirilmeye çalışılmıştır [70,74].

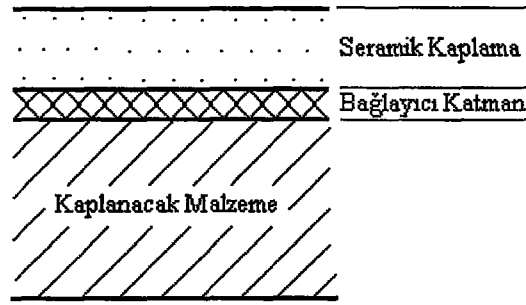
Seramik ve diğ er malzemeler için kullanılan pek çok kaplama sistemi ve tipi mevcuttur. Bunlardan en önemlileri;

- Termal Sprey Kaplama: Plazma sprej, alevle toz ve tel sprej, elektrik ark sprej, detonasyon tabancası tekniğ i, yüksek hızlı oksij yakıt sprej,
- Kimyasal Seramik Kaplama : Sol-jel, bulamaç, kimyasal buhar ç ökelmesi, fiziksel buhar ç ökelmesi, sert kaplama,
- Iş ın Kaplama,
- Ark Kıvılcım Alaş ımlandırması,
- İyon zenginleşt irmesi yöntemleridir [70,74].

Seramik kaplama ile iyi yalıtım sağ lanabildiğ i gibi, sürtünme-aş ınma, erozyon-korozyon azaltılarak malzeme yığ ılmaları önlenebilir. Bununla birlikte, bu yöntemlerden termal sprej kaplama dış ındakiler çok ince kaplamalar için uygundur. Çok ince kaplamalar gaz türbin endüstrisinde, türbin ve stator kanatçıklarının ve yanma odasının kaplanmasında başarılı bir şekilde kullanılır. Dizel motorlarında olduğu gibi daha kalın termal bariyer kaplama için genelde plazma sprej ve alev sprej iş lemleri kullanılır [70].

3.3.1. Alev sprej kaplama

Alev sprejinde oksij-hidrojen ve oksij-asetilen sistemleri kullanılmakta ve genellikle ergime sıcaklığ ı 2760°C'nin altındaki refrakter (ısı dayanımı) oksitlerin kaplanmasında tercih edilmektedir. Seramik kaplama yapılmadan önce, oksitlenmeyi önlemek amacıyla, nikel-krom gibi yüksek sıcaklığ a dayanıklı bir alaş ımın kaplanacak parçanın yüzeyine Ş ekil 3.3'de görüldüğü gibi bağ layıcı katman olarak uygulanması gerekir. Aksi halde, seramik kaplama yüzeye tam olarak yapış maz. Alev sprej yönteminde kaplama hız ı yavaş olup $4,4 \times 10^{-5}$ ile $1,13 \times 10^{-3}$ m/s 'dir. Alevle toz sprej ve alevle tel sprej olmak üzere iki çeş it alev sprej yöntemi mevcuttur [73].



Şekil 3.3. Seramik kaplama ve bağlayıcı katman [73].

3.3.1.1. Alevle toz sprej kaplama

Bu yöntemde mikro-pülverize toz alaşımları oksijen ile vakum yapılarak oksiasetilen alevi içerisinde kaplanacak yüzeye püskürtülür. Kaplama işlemi esnasında alev sıcaklığı 3300°C ve iş parçasının sıcaklığı ise 200°C civarında olduğunda soğuk sistem olarak adlandırılır. Yapışma mekaniktir. Kaplama kalınlığı püskürtülecek malzemenin ve iş parçasının şekline bağlı olarak 0,05 ile 2,5 mm arasında değişmektedir. Yüksek alaşımlı ve kendinden yağlamalı NiCrBSi malzemelerinin kaplama tozu olarak kullanılması, çubuk veya tel formunda üretilmeyen malzemelerin kaplanmasının mümkün olması bu yöntemin başlıca üstünlüklerindedir. Başta seramikler olmak üzere, metaller ve sermetlerin (metal+seramik oksit karışımı) kaplama malzemesi olarak püskürtülmesine uygundur. Rulman yatakları, mil muyluları, kompresör pistonları, kam milleri, burç ve kovalar, hidrolik silindir ve pistonlar bu yöntemle kaplanmaktadır [74,75].

3.3.1.2. Alevle tel sprej kaplama

Bu yöntem, tel halinde ve ergime sıcaklığı oksiasetilen alev sıcaklığından daha düşük olan bir metalin ergimiş halde kaplanacak yüzeye püskürtülmesi ile gerçekleştirilir. Metalik olan sprej malzemesi ile metalik kaplamalar için kullanılabilir. Kaplama malzemesi olarak kullanılan metal tel, sprej tabancasının nozulundan geçerken oksijen ve yanıcı gaz aleviyle eritilmektedir. Yanıcı gaz olan oksijenle beraber kullanılan yanıcı gazlar; asetilen, propan ve hidrojenidir. Nispeten düşük ekipman maliyeti, yüksek sprej hızları ve tel çapları için ayarlanabilmesi bu yöntemin olumlu yönleridir. Diğer yöntemlere göre elde edilen

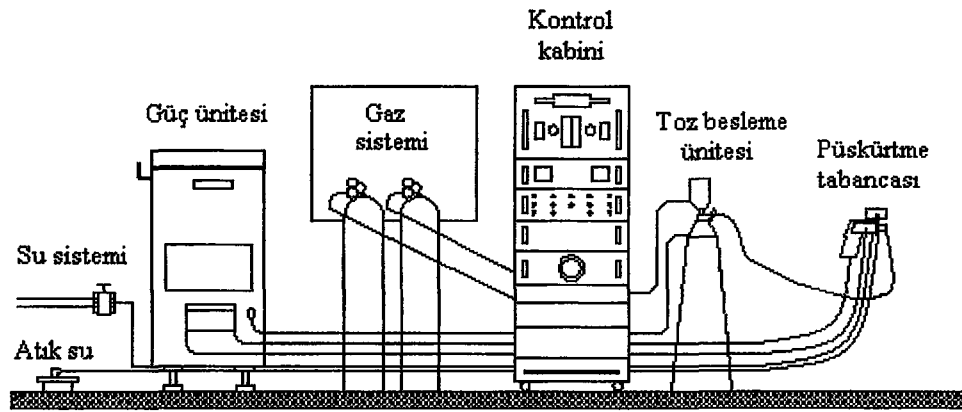
kaplama yoğunluklarının ve yapışma mukavemetinin düşük olması başlıca olumsuz yönleridir. Rulman yerleri, hidrolik piston milleri, her türlü yatak, şaft, millerin aşınan yüzeyleri, piston segmanları, senkromençler, krank milleri ve debriyaj baskı plakaları alevle tel sprej yöntemi ile kaplanabilmektedir [74,75].

3.3.2. Atmosferik plazma sprej kaplama

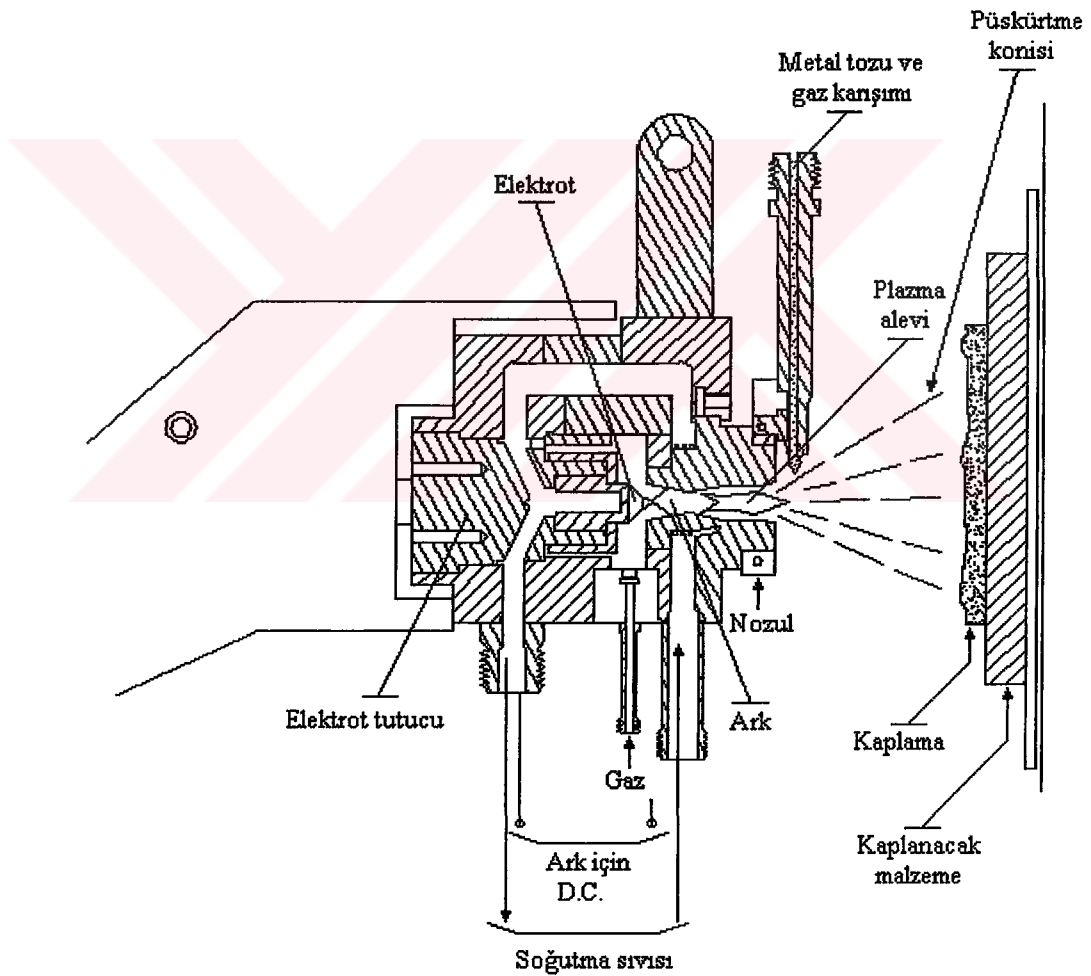
Plazma, eşit sayıda serbest elektron ve pozitif iyon bulunduran, genellikle maddenin dördüncü hali olarak adlandırılan yoğunlaştırılmış bir gazdır. Bu yöntemin başlıca iki önemli üstünlüğü vardır. Bilinen bütün malzemeleri eritebilecek derecede yüksek sıcaklık elde edilebilir ve diğer malzemelere daha iyi ısı transferi sağlar. Plazma sprej tekniğinin yüksek işlem sıcaklığı, ergime noktası yüksek metal ve alaşımlarla çalışmaya imkan sağlamaktadır. Ayrıca inert ortamlarda kullanılabilmesi yöntemin olumlu yönüdür. Plazma sprejde argon, hidrojen veya azot gibi soy gazlar kullanıldığından kaplanacak malzemenin oksitlenme sorunu asgariye inmektedir. Toz şeklinde ve belirli tane büyüklüğünde üretilen tüm malzemeler bu işlemde kullanılabilir [73,74].

Plazma sprej tekniğindeki ana düşünce; pahalı olmayan bir ana malzeme üzerine ince ve koruyucu değeri yüksek bir tabaka meydana getirmektir. İşlem iyonize olmuş bir gaz içinde erimiş olan toz formundaki malzemenin, kaplanacak yüzeye çok hızlı bir şekilde püskürtülmesi şeklinde uygulanmaktadır. Plazma sprej işleminin gerçekleştirildiği sistem Şekil 3.4'de ve toz püskürtmesinde kullanılan tabanca Şekil 3.5'de görülmektedir. Sistem başlıca; güç ünitesi, gaz ünitesi, toz besleme ünitesi, soğutma sistemi, sprej tabancası ve kontrol ünitesinden meydana gelmektedir.

Plazma sprej yönteminde doğru akım elektrik arkı, nozul ile elektrot arasında oluşur. Soy gaz (genellikle argon) veya soy gaz karışımları ile gücü arttırmak için az miktarda ilave edilen hidrojen gazı plazma jeneratörünün ark bölgesine gönderilir ve elektrik arkı ile ısıtılır. Gaz karışımı 8300°C'ye kadar ısınarak iyonize hale gelir. Böylece yüksek sıcaklık plazma huzmesi tabancasının nozulundan çıkar. Bu sistemde seramik tozları plazma alevine, taşıyıcı gaz huzmesinde süspanse halinde beslenir.



Şekil 3.4. Atmosferik plazma sprey sistemi [73].



Şekil 3.5. Plazma sprey püskürtme tabancası [73].

Yüksek sıcaklığın etkisiyle eriyen tozlar, kaplama yapılacak yüzeyin üzerinde hızlı bir şekilde katılarak birikir. Argon/Helyum gaz karışımı, gaz akış hızını, dolayısıyla partiküllerin hızını arttırmaktadır. Plazma sprey neticesinde elde edilen

kaplamanın yapısı, ince ve eş eksenli ince taneler içerir. Bazı kaplamalarda ise, hızlı katılma sonucu amorf yapı elde edilmektedir [73].

Porozite, plazma sprej kaplamaların bir özelliğidir ve yapısal göstergesidir. Viskozitesi yüksek tozlar ve yüksek güçlü plazma üniteleri kullanılarak daha yoğun bir kaplama tabakası elde edilebilir. Gevrek ve sert tozlardan elde edilmiş kaplamalar yüksek porozite oranlarına sahiptirler. Yüksek porozite kaplamanın mekanik özelliklerinden olan sertliği olumsuz etkilemektedir. En düşük porozitede kaplamanın sertlik değeri 700 Vicker's seviyesinde iken poroz kaplamada bu değer 300 Vicker's in altındadır. Plazma sprej kaplamada oluşan porozitenin % 10 kadarı kapalı olup, gerisi çökeltilmiş partiküller arasındaki boşlukların tam olarak doldurulamaması sebebiyle yapıdaki kusurlarla birleşmiş açık porozitedir. Açık poroziteler, korozif çökelti ve gazların kaplamaya nüfuz etmesine sebebiyet vererek taban malzemesinin bozulmasına sebep olur. Diğer taraftan, özellikle katmanlar arasında yer alan yüzeye paralel boşluklar, kaplamanın yapışmasına olumsuz etki etmektedir [73,74].

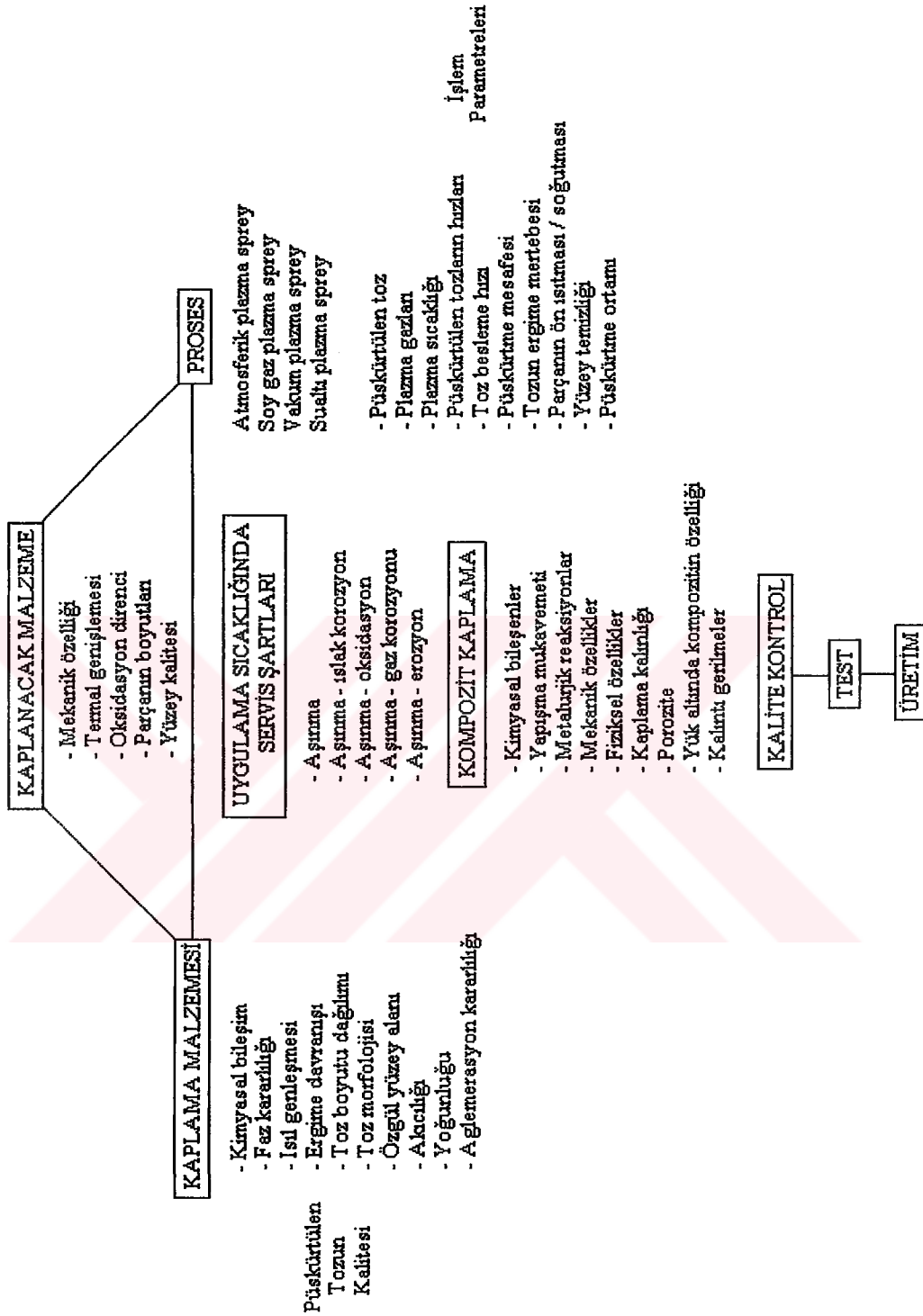
Kaplamanın iyi yapışabilmesi için kaplanacak yüzeyin pürüzlü olması, oksit, yağ, kir ve tozlardan arınması gerekmektedir. Yüzey pürüzlülüğü, genellikle kum veya alümina gibi aşındırıcı bir tozun kaplanacak yüzeye, basınçlı hava ile püskürtülmesi ile sağlanır. Yüzeyleri hazırlanmış metalik ana malzemelerin üzerine bazı özel malzemelerin ara tabaka olarak kaplanmasıyla, daha sonra yapılacak seramik kaplama için uygun bir zemin hazırlanmış olur. İyi bağlama özelliklerinin yanında ara tabakalar, ana malzeme ile kaplama arasındaki ısı genleşme farklılıklarını azaltmak, ana malzemeyi korozyon, gaz ve yüksek sıcaklık etkisinden korumak amacıyla da kullanılabilir. Ara tabaka olarak en çok kullanılan malzeme NiAl'dir. Yüzeyleri hazırlanmış parçalar, plazma alevine dik olarak yerleştirilir ve sabitlenirler. Yoğun ve iyi kaliteli bir kaplama elde etmek için, sprej tozlarının ana malzeme yüzeylerine dik olarak çarpması gerekmektedir [73,74].

Püskürtmede kullanılan toz boyutu dağılımı da önemli bir faktördür. Toz karışımında yer alan çok ince partiküller plazma sıcaklığında kolayca buharlaşır, iri taneler ise

ergimeden kaplanacak yüzeye yapışır ve yapının poroz olmasına yol açarlar. Araştırmalar, toz boyutunun $-60+10\ \mu\text{m}$ aralığında iyi sonuç verdiğini göstermiştir.

Plazma sprej işlemi, atmosferik ortamda veya düşük basınçlı ortamda yapılmaktadır. Düşük basınçta yapılan plazma sprej işleminde, plazma alevinin boyu 20 cm'ye kadar uzamakta ve daha yoğun bir kaplama elde edilmektedir [73]. Plazma sprej işleminin belli başlı bileşenleri ve bunlara etki eden parametreler Şekil 3.6'da gösterilmiştir. Belirli bir kaplama işlemi için tespit edilen işlem parametrelerinin bir kısmı, plazma sprej işlemi yapan kişiye bağlıdır. Kaplama kalitesine bu parametrelerin etkisini bertaraf edebilmek için tabancanın yatay ve dikey hareket eden sistemlere ya da bir robota bağlanması uygun bir çözüm olarak görülmüş ve uygulanmıştır .



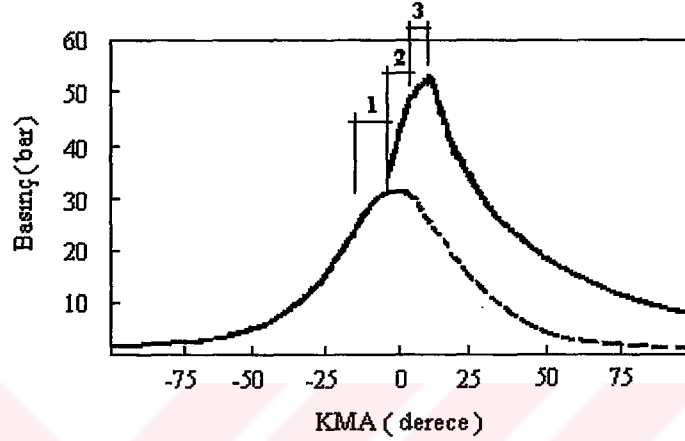


Şekil 3.6. Plazma sprey kaplama teknolojisi; bileşenler ve parametreler [73].

3.4. Düşük Isı Kayıplı Dizel Motorlarında Yanma

Dizel motorlarında hava, emme zamanında herhangi bir kısılmaya maruz bırakılmadan silindirlere doldurulur. Sıkıştırma oranı yüksek olduğundan, sıkıştırma

zamanının sonuna doğru, silindirdeki gaz sıcaklığı oldukça yüksektir. Üst ölü nokta (ÜÖN)'dan hemen önce yakıt püskürtülmeye başlanır ve yüksek sıcaklık yüzünden hemen hemen püskürtüldüğü gibi tutuşur ve yanar. Ricardo; yanma olayının üç ayrı safha halinde incelenebileceğini ileri sürmüştür. Şekil 3.7'de görüldüğü gibi bunlar; tutuşma gecikmesi (1), ani yanma (2) ve kontrollü yanma (3) safhalarıdır [76].



Şekil 3.7. Dizel motorunda yanma safhaları [76].

Tutuşma gecikmesi :

Yakıtın püskürtülmeye başladığı an ile yanmaya başladığı an arasındaki süreçtir. Püskürtülen yakıt damlacıklarının buharlaşması belli bir süre almaktadır. Damlacıkların etrafında püskürtmenin hemen ardından bir buhar tabakası oluşmakta ve yanma bu buhar tabakasında başlamaktadır. Tutuşma gecikmesini etkileyen en önemli etkenler; yakıt kalitesi, buhar fazındaki yakıt tabakasını çevreleyen havanın oksijen konsantrasyonu, basınç ve sıcaklıktır. Yüksek basınç ve sıcaklık tutuşma gecikmesini kısaltır. Tutuşma gecikmesi süresince püskürtülen yakıt miktarı tutuşma gecikmesini etkilemez. Yakıt tutuşma gecikmesi süresince silindirlere girer ve tutuşma başlayıncaya kadar birikir.

Ani yanma :

Tutuşma gecikmesi süresince yakıt silindirlere girmekte ve buharlaşmaktadır. Yine bu süre zarfında damlacıklar daha küçük parçacıklara bölünüp hava ile daha iyi karışmaktadırlar. Yanma başladığı zaman ise oksijenle temas eden yakıt büyük bir

hızla yanar. Bu yanma hızı silindir içerisindeki basınç artma hızını (dp/dt) da belirler. Yüksek bir basınç artma hızı, hareketli motor parçalarına ani bir yük uygulanması demek olacağından, bu parçalarda tahribata sebep olur. Basınç artma miktarı esas olarak püskürtülen yakıt miktarına bağlıdır. Yanmanın bu safhası tutuşma gecikmesine oranla çok daha kısa olduğundan yakıtın büyük bir kısmı tutuşma gecikmesi süresince püskürtülmektedir. Dolayısıyla maksimum basıncı tutuşma gecikmesi tayin etmektedir.

Kontrollü yanma :

Tutuşma gecikmesinde püskürtülen yakıtın tamamen yanması ile bu safhaya geçilir. Ani yanma süresi sonundaki basınç ve sıcaklık çok yüksek olduğundan bu safhayı takiben püskürtülen yakıt oksijen bulunca hemen yanar. Yanmaya hazır karışım miktarı ile yanma kontrol edilir. Bu safhadaki yanma hızı yakıt buharı ile havanın karışmasına bağlıdır. Verimin yüksek olması için yanmanın ÜÖN'ya mümkün olduğunca yakın tamamlanması istenir.

Kontrollü yanma ile egzoz supabının açılmasına kadar geçen süre, yakıtın küçük bir kısmı henüz yanmadığından, art yanma olarak kabul edilebilir. Yakıtça zengin yanma ürünleri ve is içindeki enerji hala açığa çıkabilir. Bu safhada yanma tamamlanmakta, silindir hacminin artması sebebiyle de basınç ve sıcaklık düşmektedir [28,77].

DIK dizel motorlarında Şekil 3.8'den de görüleceği üzere izolasyon neticesinde, silindir içi ortalama gaz sıcaklıkları artmaktadır. Isı yalıtımı neticesinde sıkıştırma zamanında ÜÖN civarında silindir içi gaz sıcaklığı, standart motora göre yaklaşık 250 K daha fazla olmaktadır. Bu şartlardaki hava içerisinde püskürtülen yakıt daha fazla ısınacağından, tutuşma gecikmesi kısılacak ve yanma hava ile yakıt yeterince karışmadan başlayacaktır. Arrhenius kanuna göre (Denklem 3.1) reaksiyon hızı sıcaklığa bağlı olarak üstel bir şekilde artmakla birlikte, yüksek sıcaklıkta yakıt demeti ve alevin içerisine giren hava miktarı da havanın viskozitesinin sıcaklıkla artmasından dolayı azalmaktadır [78].

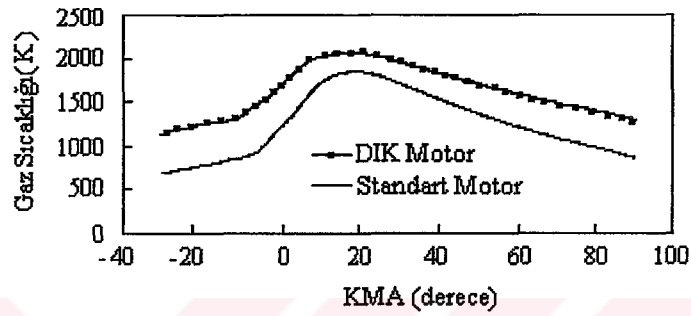
$$k = A^{(-E/RT)} \quad (3.1)$$

k : reaksiyon hızı sabiti

E : aktivasyon enerjisi (J/mol)

A : sabit

R : üniversal gaz sabiti (J/K.mol)



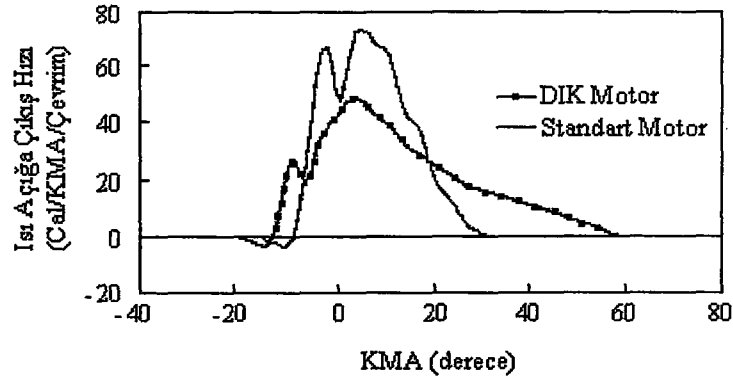
Şekil 3.8. DIK ve STD dizel motorlarında silindir içi gaz sıcaklıklarının değişimi [78].

Yanma odasına püskürtülen yakıt, yakıt demeti çevresinden buharlaşıp ayrılmaya başlar. Yakıt demetinin momentumu ve kinetik enerjisi dolayısıyla yüksek sıcaklıktaki hava, yakıt demetinin içerisine nüfuz eder. Yakıt demetinin dış tabakasında, yoğunluğu fazla ve uçuculuğu yüksek olan HC'lar birikir. Yakıt demetinin en dış tabakasındaki gaz karışımları, yüksek sıcaklıktaki hava dolayısıyla yanmaya başlar. Sonuçta , yakıt demetinin dış yüzeyinde buharlaşma ve ısıl ayrışma ile oluşan yanmış gazlar ve diğer gazlar artarak yakıt demetini dışarıdan çevrelerler. Bu gazlarla birlikte aynı zamanda havada yakıt demetine nüfuz eder. Fakat yanmaya uygun gaz karışımları, yakıt demetine havanın girmesini engeller. Dolayısıyla yanma hızı kötüleşir [78]. DIK ve standart dizel motorlarında KMA'na bağlı olarak ısı açığa çıkış hızındaki değişim Şekil 3.9'da görülmektedir.

Literatürde DIK dizel motorundaki yanma işlemi, STD dizel motoru ile karşılaştırıldığında genel olarak şu değişimler gözlenmiştir;

- Tutuşma gecikmesi kısalmaktadır.
- Ani yanma süresi kısalırken, kontrollü yanma süresi uzamaktadır.
- Toplam yanma süresi artmaktadır.

(d) Kontrollü yanma safhasındaki ısı açığa çıkış hızı azalmaktadır [79].



Şekil 3.9. DIK ve STD dizel motorlarında ısı açığa çıkış hızı değişimleri [79].

Tutuşma gecikmesi periyodunun kısalması ile, ani yanma periyodu kötüleşecek ve kontrollü yanma periyodu için gerekli karışım oluşumu sağlanamayacaktır. Diğer taraftan havanın yakıt demetine nüfuzunun azalması yüzünden kontrollü yanma periyodu uzamıştır. Ayrıca yüksek sıcaklıktaki yanma sırasında, alev etrafında yüksek sıcaklık bölgeleri oluşur. Bu bölgeler NO_x oluşumuna yol açar. Diğer taraftan iş zamanındaki genişleme sırasında alev sıcaklığının hızla düşmesi sonucu reaksiyonlar kesileceğinden duman (is) oluşmaktadır. Dolayısıyla DIK dizel motorlarındaki yanma işlemini iyileştirebilmek için kontrollü yanma sırasında yakıt demetine nüfuz eden hava miktarının artırılıp, hava ile yakıtın daha hızlı karışmasının sağlanması ve tutuşma gecikmesi süresinin, kontrollü yanma periyodu için gerekli karışım oluşmasını sağlayacak kadar uzun olması gereklidir [78].

3.5. Kaynak Araştırması

DIK dizel motorları üzerinde 1970'lerden beri, giderek artan bir şekilde araştırmalar yapılmaktadır. DIK motor tasarımında yalıtım amacıyla hemen hemen başlangıçtan itibaren seramik malzemeler kullanılmaktadır. Günümüzde ileri teknoloji seramikleri dizel motoru ve gaz türbinlerinde kaplama amacıyla kullanılmaktadır. Dizel motorlarının ısı kayıplarının azaltılabilmesi için piston, silindir kapağı, supaplar, silindir cidarı, egzoz portları, ve egzoz turbo kompresörü gibi parçalar kaplanabilmektedir. DIK hale getirilmiş motorun egzoz gaz sıcaklığı önemli

miktarda arttığından dolayı, deneysel çalışmalarda genellikle turboşajlı dizel motorları tercih edilmektedir. Bununla birlikte, DIK motor tasarımında herhangi bir standart belirlenmediğinden dolayı yapılan çalışmalarda, birbiri ile çelişen neticeler de elde edilebilmektedir [71,74,79].

Prasad ve ark. [80] 3,68 kW'lık bir motorun piston ve silindir cidarını ısı iletim katsayısı 0,057 W/m K olan Superni-90 ile kaplamışlar, yakıt olarak ise ham jatropha ve pongamia ile esterleştirilmiş jatropha kullanmışlardır. Yapılan deneyler sonucunda; DIK motorda bitkisel yağ kullanımı ile No 2 dizel yakıtına göre motor performansı iyileşme gösterirken, NO_x emisyonları azalmıştır. Isı kayıplarının azaltılması neticesinde, egzoz gaz sıcaklığı artmıştır. Esterleşmiş jatropha yağı yüksek duman emisyonu hariç, dizel motorları için uygun bir alternatif yakıt olarak bulunmuştur.

Yaşar ve ark.[81] 6 silindirli, aşırı doldurmalı, ara soğutmalı bir dizel motorun silindir kapağı ve supaplarını 0,35 mm kısmi stabilize zirkonya ile kapladıkları çalışmada hacimsel verimde % 1-3 artış, özgül yakıt tüketimde % 6'lık azalma tespit etmişlerdir. Ayrıca 250 saatlik test sonucunda seramik kaplanmış parçaların mükemmel durumda olduğunu belirtmişlerdir.

Kvernes ve ark. [82] piston ve supapları 0,5 mm kısmi stabilize zirkonya ile kaplanmış bir orta devirli dizel motorun 14000 saatlik dayanım testinde başarı sağlamışlar, bu deneme neticesinde yakıt sarfiyatında % 5'e varan azalmalar tespit etmişlerdir.

Uzun ve ark. [83] aşırı doldurmalı, ara soğutmalı ve direkt enjeksiyonlu düşük ısı kayıplı bir dizel motorunda yapmış oldukları deneyler sonucunda, CO emisyonlarında %35-40, yanmamış HC emisyonlarında % 40, partikül madde emisyonlarında % 48'lik azalma olurken, NO_x emisyonlarının ise arttığını belirtmişlerdir.

Kawamura ve ark. [78] tek silindirli, 0,45 l'lik direkt püskürtmeli, aşırı doldurmalı bir DIK dizel motorunda yaptıkları çalışmada; silindir cidarının iyi bir şekilde

yalıtılması ile ısı kayıplarının % 70'den daha fazla azaltılabileceğini, piston tepesindeki sıcaklığın 973 K'e kadar çıktığını, standart motora göre sıkıştırma sonu sıcaklığının 250 K daha yüksek olduğunu ve tutuşma gecikmesi süresinin 0,6 milisaniye daha kısa olduğunu belirlemişlerdir.

Schwarz ve ark [84] tek silindirli, direkt püskürtmeli, sıkıştırma oranı 13,9/1 olan, 1,85 l'lik bir dizel motorunun pistonunu plazma sprey yöntemiyle 1 mm kalınlığında zirkonya kaplamışlardır. Deneyler sonucunda; DIK motorda tutuşma gecikmesinin ve ani yanma süresinin kısılarken toplam yanma süresinin arttığını (% 3-10), tam yük şartlarında DIK motorda ÖYT'nin % 3 daha iyi olmasına karşın, yüksek hızlarda % 5 daha kötü olduğunu; silindir kapak sıcaklığının 93 °C daha yüksek olurken, egzoz supapları arasındaki bölgede en yüksek sıcaklığın 434 °C olduğunu belirtmişlerdir.

Parlak ve ark.[85] tek silindirli, endirekt enjeksiyonlu, aşırı doldurmalı ve sıkıştırma oranı değişebilir bir DIK motorda yaptıkları deneylerde, sıkıştırma oranını 18,2/1'den 16,8/1'e düşürerek güçte fazla bir kötüleşme olmadan özgül yakıt tüketimini iyileştirmişlerdir. Ayrıca NO_x emisyonlarında yaklaşık % 14'lük azalma sağlamışlardır.

Woods ve ark.[86] tek silindirli, aşırı doldurmalı, direkt püskürtmeli, 2,3 l'lik bir dizel motorunun yanma odası elemanlarını, silindir cidarını, emme ve egzoz portlarını seramik kaplamışlardır. Testler sonucunda DIK motorda; soğutma suyuna giden ısının % 52 azalmış, ara soğutucunun devreden çıkartılması ile önemli miktarda ısı kaybı engellenmiş (silindire gönderilen yakıt enerjisinin % 9,7'si kadar), toplam yakıt ekonomisi % 5 iyileşmiş, hacimsel verim % 5,4 azalmış, soğutucu fan için gereken güç yaklaşık % 70 azalmış; bu ise motor gücünde % 5,5'lik bir artış sağlamış ve yüksek hız kısmi yük bölgesindeki çalışmada yakıt tüketimi % 26 azalmıştır.

Alkidas [87] tek silindirli, direkt püskürtmeli, 2 l'lik, sıkıştırma oranı 16/1 olan bir dizel motorunu standart olarak ve soğutma sistemini devreden çıkartarak denemiştir. Soğutmasız motorda; ÖYT düşük hızlarda % 6,5-5,5 iyileşmiş, yüksek hızlarda ise standart motorla aynı kalmış, indike ve fren ortalama efektif basınçları artmış, NO_x

emisyonları % 30-50 artmış, HC emisyonları düşük hızlarda yaklaşık % 20 azalırken yüksek hızlarda % 70'lere varan artış olmuş, duman (is) emisyonunda ise % 75'e varan azalma olduğunu belirterek, DIK motorlardaki yanma işleminin yüksek hızlarda kötüleşmesinin sebebinin ısı taşınım katsayısındaki artış dolayısıyla silindir cidarından olan ısı transferinin artmasından değil, hava ile yakıtın yetersiz karışmasından kaynaklandığını belirtmiştir.

Kawamura ve ark. [88] 2 l'lik, endirekt püskürtmeli, sıkıştırma oranı 17/1 olan DIK bir dizel motorunda ısı kayıplarını % 75 azaltmışlar, duman ve NO_x emisyonlarının standart motor ile aynı seviyede kalırken, yakıt tüketiminin % 5-10 daha iyi olduğunu gözlemlemişlerdir.

Wang ve ark. [89] DIK motorlardaki basınç ve sıcaklıkları, kapalı bir kaptaki simüle ederek ortam sıcaklığının, basıncının ve püskürtme parametrelerinin; tutuşma gecikmesine, alev yayılmasına ve yanma hızına etkilerini deneysel olarak incelemişlerdir. Yüksek sıcaklıklarda enjektör içindeki kaçakların artması ve yakıt viskozitesinin azalması yüzünden, yakıt püskürtme basıncının, buna bağlı olarak da püskürtme hızının azaldığını, 1073 K sıcaklıkta 0,35 mm enjektör delik çapı için, tutuşma gecikmesinin 773 K'e göre % 72 daha kısa olduğunu, ortam sıcaklığı arttıkça açığa çıkan maksimum ısı miktarının azaldığını ve yanma süresinin uzadığını belirterek, DIK motorlardaki yanma işleminin iyileştirilebilmesi için enjektör delik sayısının artırılıp, delik çapının azaltılmasını, püskürtme avansının optimize edilmesini ve yanma odası içerisinde yakıt demetinin türbülans oluşturarak dağıtılmasını önermişlerdir.

Alkidas [90] tek silindirli, direkt püskürtmeli, 2 l'lik, sıkıştırma oranı 16/1 olan bir dizel motorunun soğutma sistemini devre dışı bırakıp, piston tepesi nikel konsantrasyonu yüksek alaşımdan olan, hava boşluklu piston kullanarak DIK hale getirerek yaptığı çalışmada; motor performansı, egzoz emisyonları ve ısı açığa çıkış karakteristiklerini incelemiştir. Çevrim başına silindire püskürtülen yakıt miktarı aynı tutulduğunda standart motora göre DIK motorun ÖYT 'nin düşük hız-yüksek yük bölgesi haricinde düşük olduğunu, sürtünme ve pompalama kayıpları ile ısı veriminin düşük olduğunu, ani yanma süresinin kısılırken, kontrollü yanma

süresinin uzadığını, karışımın % 1-90'nın yandığı aralık olarak tarif edilen ısı açığa çıkış süresinin, daha kısa olduğunu, NO_x emisyonunun yüksek, HC emisyonunun ise düşük olduğunu, duman emisyonunun ise düşük hız-yüksek yük bölgesi hariç düşük olduğunu vurgulamıştır.

Yaşar ve ark.[91] altı silindirli, 5,95 l'lik, aşırı doldurmalı dizel motorunun standart ve DIK durumunu termodinamiğin 1. ve 2. kanununa göre karşılaştırmalı olarak analiz ettikleri çalışmalarında, DIK dizel motorunun 2. kanun veriminin STD motora göre % 2,85 oranında arttığını tespit etmişler, yaptıkları tersinmezlik analizleri neticesinde DIK motordaki yanmadan kaynaklanan ve kimyasal tersinmezliklerin hemen hemen aynı kalırken, ısı transferinden kaynaklanan tersinmezliklerin toplam tersinmezlik içerisindeki payının önemli ölçüde azaldığını gördüklerini belirterek, bunun efektif motor gücünde ciddi bir artışa yol açmadığını, buna karşılık egzoz gazlarının kullanılabilir enerjisinin % 5-12 arttığını, DIK motordan en yüksek performansı elde edebilmek için egzoz sistemine ilave bir güç türbininin eklenmesi gerektiği sonucuna varmışlardır.

Parlak [92] tek silindirli, endirekt püskürtmeli, değişken sıkıştırma oranlı bir dizel motorunun silindir kapağı, piston ve supaplarını seramik malzeme (MgO-ZrO₂) ile kaplanmasının motor performansına etkisini araştırmıştır. DIK motorun hacimsel verim kaybını gidermek için emme manifoldu basıncı değiştirilmiş, bu sayede motor performansında tatmin edici sonuçlar elde edilmiştir. Standart motora göre, ÖYT % yaklaşık 4,5 ve CO emisyonu % 56 azalmış, efektif verim % 1,5 artmış, NO_x emisyonunun ise artan yanma sıcaklığı nedeniyle % 12'ye kadar arttığını belirtmiştir.

Assanis ve ark.[93] seramik kaplamalı ve kaplamasız motorun yanma odasındaki yüzey sıcaklıklarının, ısı iletim katsayısı 1,2 W/mK olan zirkonya kalınlığına göre, değişiminin tahmini için bir bilgisayar simülasyonu yapmışlar, dökme demir yüzeydeki çevrim boyunca sıcaklık değişiminin az olduğunu, kaplama kalınlığı arttıkça kaplanmış elemanların ortalama sıcaklıklarının arttığını ve 0,5 mm'lik kaplama kalınlığı için çevrim boyunca sıcaklık değişiminin en yüksek olduğunu belirlemişlerdir.

Parlak ve ark. [94] yanma sıcaklığı-sıkıştırma oranı ilişkisinin motor performansına etkisi üzerine yaptığı teorik çalışmada, yanma sıcaklığı artırılıp sıkıştırma oranı düşürüldüğünde motor gücü ve veriminin nasıl değiştiğini incelemiştir. Analiz sonucunda maksimum yanma sıcaklığı artırılarak sıkıştırma oranı düşürüldüğünde, güç ve verimin, maksimum güç ve bu güce karşılık gelen verime göre düştüğünü, ancak normal durumda ulaşılan optimum değerlere göre daha iyi sonuçların elde edildiğini belirlemiştir.

Kamo ve ark.[70] malzemedeki sıcaklık değişiminin, yüzeydeki sıcaklık değişiminin % 1'ine düştüğü noktanın yüzeye olan uzaklığını nüfuz derinliği olarak tanımlayıp, plazma sprey zirkonya ve dökme demir için sıcaklık farkına bağlı olarak nüfuz mesafesinin değişimini hesaplamışlardır. Dökme demirin ısı yayılım katsayısının ($1,5625 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$) plazma sprey zirkonyadan ($3,15 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$) fazla olduğu için nüfuz mesafesinin de yaklaşık on kat fazla olduğunu, dolayısıyla ısı yayılımı düşük olan malzemede, yüksek olana göre sıcaklık değişimlerinin daha çabuk sönümlendiğini vurgulamışlardır.

Parlak ve ark. [95] altı silindirli, direkt püskürtmeli, sıkıştırma oranı 16,5/1 olan motorun silindir kapağı ve supaplarını CaO-ZrO_2 , pistonlarını ise MgO-ZrO_2 ile plazma sprey yöntemiyle kaplamışlar ve seramik kaplamanın motor performansına ve egzoz gazlarının ekserji potansiyeline etkilerini incelemiştir. DIK motorda standart motora göre ÖYT % 6 azalırken, ısı verim % 2 iyileşmiş, egzoz gazlarının ekserjisinde % 3-27 yükselme olduğunu, fakat bu enerjinin en fazla % 47'sinin faydalı işe dönüştürülebileceğini belirtmişlerdir.

Kimura ve ark. [96] dört silindirli, direkt püskürtmeli, 1,9 l'lik, sıkıştırma oranı 18/1 olan, aşırı doldurulmalı bir dizel motorun pistonlarının tepesini termal bariyer olarak kaplayarak, bu durumun ısı transferi ve ısı verime etkisini incelemiştir. 200 saatlik çalışma neticesinde herhangi bir anormallik olmadığını belirterek, yanma odasından transfer edilen ısının yanma odası geometrisi ve türbülans oranından etkilendiğini ve yalıtım neticesinde ısı transferinin azaldığını belirlemişler, fakat yanma kötüleştiğinden dolayı ısı verimde herhangi bir iyileşme olmadığını, yüksek hızlı yanma fotoğraflarından termal bariyer kaplama ile yanma odasındaki alevin

yaklaşık % 10-20 azaldığını tespit etmişler ve yanma işleminin kötüleşmesinin bu durumdan kaynaklandığını vurgulamışlardır.

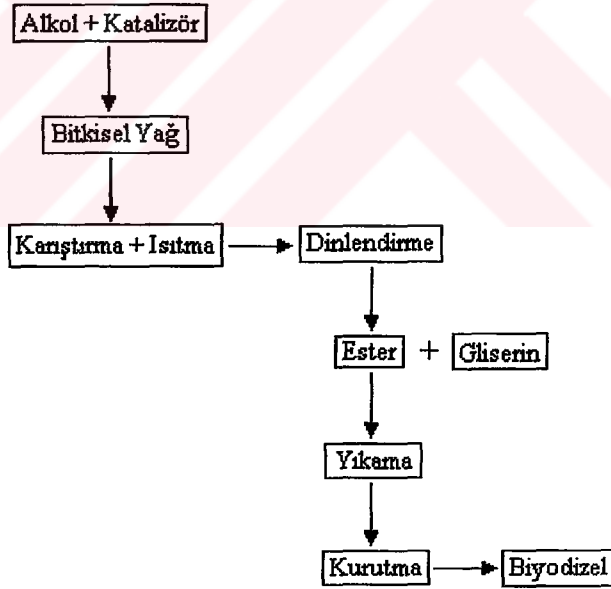
Parlak [97] tek silindirli, endirekt püskürtmeli, değişken sıkıştırma oranlı bir DIK dizel motorunda optimum püskürtme avansındaki ısı transferinin performansa ve egzoz gazlarının kullanılabilirliğine etkisini incelemiştir. Çevrim analizi sonucunda, sabit yanma hızı ve kesme oranında ısı transferindeki azalmanın, egzoz gaz sıcaklığını artırdığını belirlemiş, deneysel çalışmada ise DIK motordaki en düşük ÖYT'nin standart motordaki püskürtme avansından (34 KMA) 4 KMA daha öne alınmasıyla (38 KMA) elde edildiğini, bu şartlarda ÖYT'nin % 6 azaldığını fren ısı veriminin % 2 yükseldiğini, egzoz gaz sıcaklığındaki artışın % 10,8 olurken, 34 KMA'lık püskürtme avansında bu farkın % 22,8'e çıktığını, DIK motorda püskürtme avansı 38 KMA iken egzoz gazlarındaki maksimum kullanılabilir enerji miktarı % 13,45 iken, optimum püskürtme avansında (34 KMA) bu oran % 38'e ulaştığını belirterek, egzoz gazlarının enerjisindeki bu artıştan yararlanabilmek için ikinci bir türbine gerek olduğunu belirtmiştir.

BÖLÜM 4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

4.1. Materyal

4.1.1. Biyodizel üretimi

Ayçiçek yağından biyodizel üretme işlemi Sakarya Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Makine Eğitimi Bölümü Otomotiv Anabilim dalı laboratuvarlarında gerçekleştirilmiştir. Kullanılmamış rafine ayçiçek yağından biyodizel üretiminin aşamaları Şekil 4.1’de görülmektedir



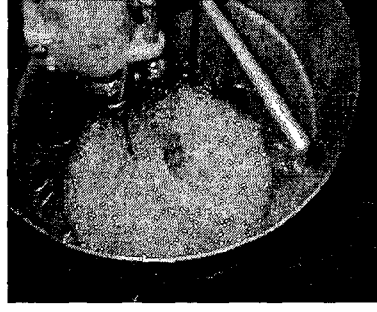
Şekil 4.1. Biyodizel üretim aşamaları.

Biyodizel üretiminin esası, bitkisel yağın alkol ile (metanol veya etanol) reaksiyona sokulmasında kullanılan katalizörün uygun şekilde seçilmesidir. Bu reaksiyonda (transesterifikasyon) katalizör olarak alkali (baz) veya asit maddeler kullanılabilir.

Bazik katalizör kullanılması ile bitkisel yağın biyodizele dönüşüm oranının arttığı ve reaksiyon süresinin kısaldığı belirlenmiştir. Transesterifikasyon işleminde bazik katalizörlerin kullanıldığı reaksiyon hızı, aynı miktar asit katalizör kullanıldığı duruma göre yaklaşık 4000 kat hızlı meydana gelmektedir. Optimum reaksiyon sıcaklığı ise asit katalizör kullanıldığı duruma göre daha düşük sıcaklıklarda gerçekleşmektedir. Atmosferik basınç altında reaksiyon sıcaklığı genelde metanolün kaynama noktasına yakın (60-70 °C) seçilmektedir. Bitkisel yağ / alkol mol oranı 6/1 olarak önerilmektedir. Bazik reaksiyonlarda bitkisel yağ 90 dakika içerisinde % 98'e varan oranlarda metil estere dönüşmektedir. Esterleştirme işleminden sonra ise değişik ayırma ve saflaştırma işlemleri yapılmaktadır [18,26,27,41].

Bu çalışmada bazik karakterli potasyum hidroksit (KOH) katalizör olarak seçilmiştir. Reaksiyon sıcaklığı 60°C'de tutularak bir saat süreyle reaksiyon gerçekleştirilmiştir. Alkol olarak metanol kullanılmıştır. Yakıt üretimi sırasında sıcaktan ve alkol-katalizör karışımı buharından korunmak için güvenlik tedbiri olarak gözlük ve maske kullanılmıştır. Ayçiçek yağından biyodizel elde edilmesi işleminde Oğuz [41]'un kullandığı yöntem esas alınarak, aşağıdaki işlemler gerçekleştirilmiştir :

1. Ayçiçek yağı reaksiyon tankına konularak 60°C'ye ısıtıldı ve bir termostat vasıtasıyla reaksiyon süresince sıcaklık sabit tutuldu. Bir termometre yardımıyla da termostatın yağ sıcaklığını istenilen seviyede tutup tutmadığı kontrol edildi. Sıcaklığın her noktada aynı olabilmesi için bir karıştırıcı vasıtasıyla yağ karıştırıldı.
2. Yağ hacminin % 20'si kadar metanol ve litre başına 3,5 gr KOH katalizör ayrı bir kaptaki alkolün içerisinde çözündürülerek reaksiyon tankına ilave edildi.
3. Karışımın sıcaklığı 60°C'de kalmak şartıyla, 1200 devir/dakika'da dönen bir karıştırıcı ile karıştırılarak bir saat süre ile bu şartlarda reaksiyonun gerçekleşmesi için beklenildi. Karışımın reaksiyon sırasındaki durumu Şekil 4.2'de görülmektedir.



Şekil 4.2. Esterleştirme reaksiyonu.

4. Reaksiyon tamamlandıktan sonra karışım dinlendirme tankına alınarak, ham biyodizel ile gliserin ayrışana kadar beklenildi. Ayrıştıktan sonra ise gliserin tahliye edildi.
5. Ham biyodizelin içerisinde kalan alkol ve katalizör artıklarının temizlenebilmesi için yakıt yıkama tankına alınarak burada 1/1 oranında saf su ile karıştırıldı. Bir hava pompası yardımıyla en az 8 saat süreyle hava basılarak, kabarcık yöntemiyle biyodizel yıkandı. Yıkama sırasında köpürmeyi önlemek için bir enjektör yardımıyla karışıma pH değeri 7 oluncaya kadar sülfürik asit (H_2SO_4) püskürtüldü.
6. Yıkama işlemi tamamlandıktan sonra karışım en az 12 saat dinlendirilerek saf su ile biyodizelin ayrışması beklendi ve saf su tahliye edildi.
7. Yıkama sırasında biyodizelin içerisinde kalabilecek suyu buharlaştırmak için yakıt $100^{\circ}C$ 'ye ısıtılarak en az yarım saat süre ile bu sıcaklıkta beklenildi. Biyodizel soğuduktan sonra depolandı. Böylece ayçiçek yağından biyodizel üretim işlemi tamamlandı.

4.1.2. Biyodizel özellikleri

Üretilen yakıtlardan alınan 1 litrelik numune ODTÜ Petrol Araştırma Merkezinde analiz edilmiş ve biyodizelin bazı özellikleri TÜPRAŞ'dan alınan dizel yakıtı özellikleri ile birlikte Tablo 4.1'de verilmiştir.

Tablo 4.1. Deneyler sırasında kullanılan yakıtların fiziksel ve kimyasal özellikleri.

ÖZELLİKLER	DİZEL YAKITI	BİYODİZEL
Kinematik Vizkozite 40°C'de (cst)	3,25 ^a	5,78
Alt Isıl değer (kJ/kg)	42550 ^a	36660
Yoğunluk 15°C'de (kg/l)	0,84 ^a	0,892
Alevlenme Noktası (°C)	55 ^b	157,6
Donma Noktası (°C)	-10 ^c	-6
Setan İndeksi (hesaplanmış)	46 ^b	46

^a Tüpraş tarafından garanti edilen değerlerin ortalaması ^b Tüpraş tarafından garanti edilen minimum değer ^c Tüpraş tarafından garanti edilen maksimum değer

Dizel yakıtlarının tutuşma özelliklerini belirten setan indeksinin belirlenmesinde aşağıda verilen ASTM D976-91 standardındaki formül kullanılmıştır [98];

$$\text{Hesaplanmış Setan İndeksi} = 454,74 - (1641,416 \times D) + (774,74 \times D^2) - (0,554 \times B) + 97,803 \times (\log B)^2 \quad (4.1)$$

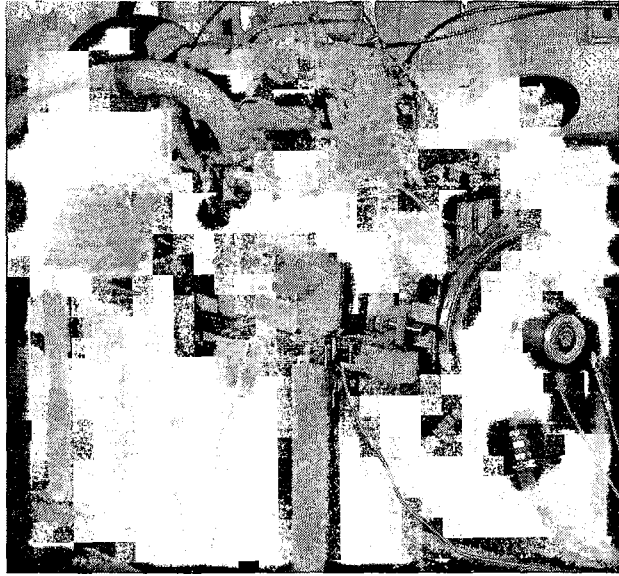
D - yakıt örneğinin 15°C'deki yoğunluğu (g/ml)

B - yakıt örneğinin yarısının damıtıldığı sıcaklık (°C)

Yakıt örneğinin yarısının damıtıldığı sıcaklığın belirlenmesi işlemi ASTM D-976'ya göre Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Kimya Mühendisliği Laboratuvarlarında gerçekleştirilmiştir. Sıcaklık 348 °C olarak bulunmuştur. Daha sonra yoğunluk ve sıcaklık değerleri Denklem 4.1'de yerine konularak biyodizelin setan indeksi hesaplanmıştır.

4.1.3. Deney motoru

Motor deneylerinde Mercedes-Benz marka direkt püskürtmeli, aşırı doldurmalı bir dizel motor kullanılmıştır. Deney motorunun genel görünümü Şekil 4.3'de, teknik özellikleri Tablo 4.2'de görülmektedir.



Şekil 4.3. Deney motoru.

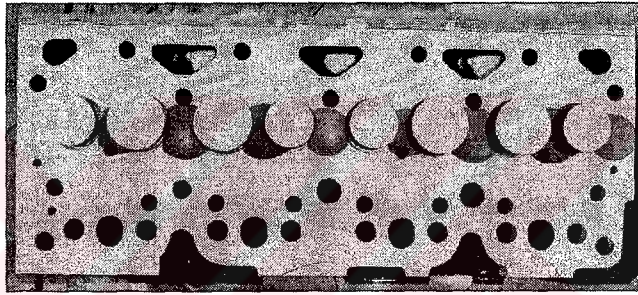
Tablo 4.2. Deneylerde kullanılan motorun teknik özellikleri.

Marka ve model	Mercedes-Benz OM364A
Çalışma prensibi	4 zamanlı
Silindir sayısı	4
Silindir çapı (mm)	97,5
Silindir stroku (mm)	133
Toplam silindir hacmi (l)	3,972
Sıkıştırma oranı	17,25/1
Maksimum devir sayısı (devir/dakika)	2800
Maksimum Motor gücü (kW/PS)	66/90 (2800 devir/dakika'da)
Maksimum döndürme momenti (Nm)	266 (1400 devir/dakika'da)
Püskürtme avansı (°KMA)	18
Püskürtme sırası	1-3-4-2
Enjektör püskürtme basıncı (bar)	200

4.1.4. Motor parçalarının termal bariyer amaçlı kaplanması

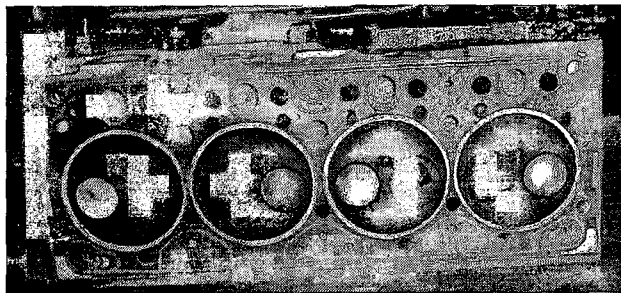
Standart motorda yakıt olarak motorin ve biyodizel kullanılarak yapılan testlerden sonra motor sökülmüş ve parçaların kaplanması işlemine geçilmiştir. Bu amaçla silindir kapağı ve supaplardan yaklaşık olarak 0,5 mm kalınlığında talaş kaldırılmıştır. Talaş kaldırma işlemi Sakarya'da Varkut Motor Yenileştirme Atelyesinde gerçekleştirilmiştir.

Motor parçalarının termal bariyer amaçlı olarak kaplanması işlemi Gebze’de bulunan Senkron Metal ve Seramik Kaplama San. ve Tic.A.Ş.’de gerçekleştirilmiştir. Silindir kapağı ve supap yüzeylerindeki kir vb. istenmeyen maddelerin giderilmesi ve kaplamanın yüzeye daha iyi yapışabilmesi için yüzey pürüzlülük değeri (R_a) 4-5 μm olacak şekilde kumlama ile temizlik yapılmış ve kaplanacak yüzeyler plazma sprej yöntemi ile yaklaşık 0,15 mm kalınlığında NiCrAl astar tabaka ile kaplanmıştır. Daha sonra astar tabakanın üzerine yaklaşık 0,35 mm kalınlığında $\text{Y}_2\text{O}_3\text{ZrO}_2$ plazma sprej yöntemi ile kaplanmış, kaplama sırasında silindir kapak ve supap sıcaklığının 100°C ’yi aşmamasına dikkat edilmiştir. Kaplama işleminden sonra silindir kapağı ve supapların durumu Şekil 4.4’de görülmektedir.



Şekil 4.4. Seramik kaplanmış parçaların motor testlerinden önceki durumu.

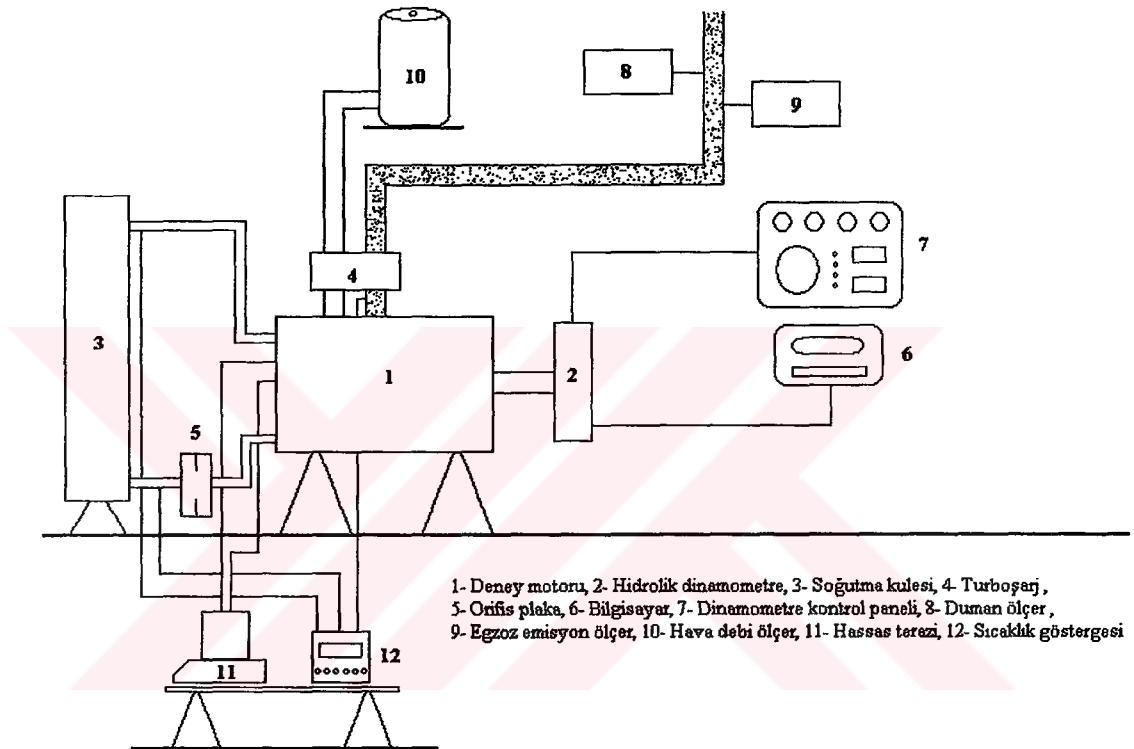
Kaplama işlemi tamamlandıktan sonra seramik kaplı parçalar motora monte edilmiş, standart motorda yapılan testler aynen tekrar edilerek seramik kaplamanın etkileri irdelenmiştir. Seramik kaplı parçaların motor testlerinden sonraki durumu Şekil 4.5’de görülmektedir.



Şekil 4.5. Seramik kaplanmış parçaların motor testlerinden sonraki durumu.

4.1 5. Deney düzeneği

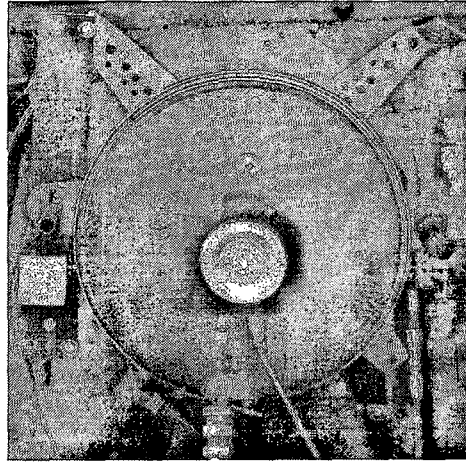
Deney düzeneği Şekil 4.6'da şematik olarak görülmektedir. Deneyler Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Otomotiv Anabilim Dalı İçten Yanmalı Motorlar Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Deneyler sırasında motor bir hidrolik dinamometre ile yüklenmiştir.



Şekil 4.6. Deney düzeneğinin şematik görünümü.

4.1.5.1. Dinamometre

Deneylerde motor devrini ve döndürme momentini ölçen GO-Power marka hidrolik dinamometre kullanılmıştır (Şekil 4.7). Dinamometrenin teknik özellikleri Tablo 4.3'de verilmiştir. Ölçümlere başlamadan önce dinamometrenin yük hücresi standart ağırlıklar kullanılarak kalibre edilmiştir.

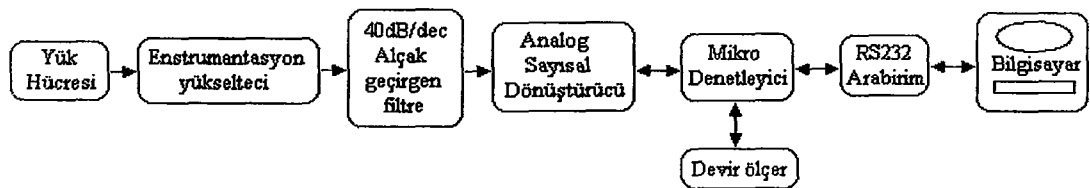


Şekil 4.7. Hidrolik motor dinamometresi.

Tablo 4.3. Hidrolik motor dinamometresinin teknik özellikleri.

	Ölçüm Aralığı	Hassasiyet
Döndürme Momenti (Nm)	0-999	$\pm 0,1$
Motor Hızı (devir/dakika)	0-7500	1

Kuvvet ölçümü, dinamometrenin moment kolu ucundaki bir yük hücresi tarafından gerçekleştirilmektedir. Motorun frenlenmesi sırasında oluşan kuvvet yük hücresi tarafından fark gerilimine dönüştürülür. Gerilim sinyali düşük olduğu için bir enstrümantasyon yükseltici tarafından yükseltilir. Sinyal istenmeyen gürültülerden arındırılmak üzere 40 dB/dec alçak geçiren filtreye uygulanır. Filtre çıkışı analog sayısal dönüştürücü tarafından sayısal sinyale çevrilerek mikro denetleyiciye aktarılır. Devir ölçüm kısmından alınan motor devir bilgisi de mikro denetleyiciye aktarılır. Mikro denetleyici, RS232 arabirim devresi yardımıyla ölçülen kuvvet ve devir bilgilerini bilgisayara aktarır [99]. Sistemin şematik görünümü Şekil 4.8’de görülmektedir.



Şekil 4.8. Kuvvet ölçüm sisteminin şematik gösterimi [99].

4.1.5.2. Hava debi ölçer

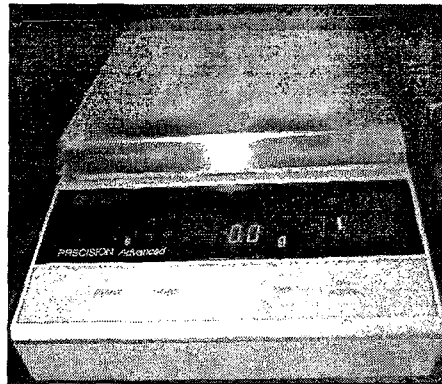
Deneyler sırasında hava tüketiminin ölçülebilmesi için Şekil 4.9’da görülen GO Power M5000 tip hava debi ölçer kullanılmıştır. Üzerinde 0-75 mm-su sütunu aralığında ölçüm yapabilen, hassasiyeti 1 mm-su sütunu olan bir eğik manometre bulunmaktadır. Deneyler sırasında hava giriş ağzına 2,75” çaplı nozul takılmıştır.



Şekil 4.9. Hava debi ölçer.

4.1.5.3. Hassas terazi

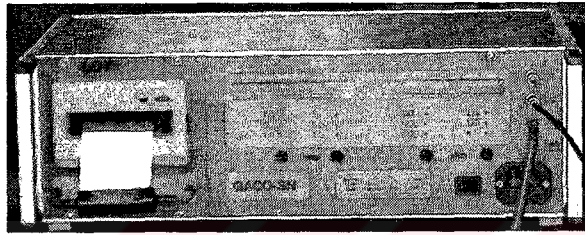
Tüketilen yakıt miktarının ölçülebilmesi için Ohaus marka 8 kg kapasiteli, 0,1 g hassasiyetli dijital terazi kullanılmıştır (Şekil 4.10).



Şekil 4.10. Hassas terazi.

4.1.5.4. Egzoz emisyon ölçüm cihazları

Egzozdaki kirletici bileşen düzeyinin belirlenmesinde iki adet emisyon ölçüm cihazı kullanılmıştır. Emisyon ölçümlerine başlamadan önce cihazlar kalibre edilmiştir. Egzoz emisyonlarının ölçümünde Şekil 4.11’de görülen GACO-SN marka ölçüm cihazı kullanılmıştır. Cihaz CO, CO₂, NO_x, O₂ ve SO₂ gazlarını ölçebilmektedir. Ayrıca hava fazlalık katsayısı ve yanma verimini de ölçebilmektedir. Cihazın teknik özellikleri Tablo 4.4’de görülmektedir.

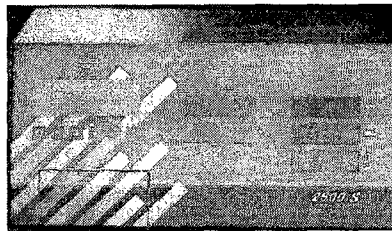


Şekil 4.11. Egzoz emisyon ölçüm cihazı (GACO-SN).

Tablo 4.4. Egzoz emisyon ölçüm cihazı teknik özellikleri (GACO-SN).

Ölçülen Parametre	Ölçüm Aralığı	Hassasiyet
O ₂ (%)	0-20,9	± 0,1
CO ₂ (%)	-	± 0,1
CO (ppm, mg/m ³)	-	± 1
SO ₂ (ppm)	0-2000	± 1
NO _x (ppm, mg/m ³)	-	± 1
HFK	-	± 0,01
Yanma Verimi (%)	0-100	± 0,1

Duman koyuluğunun ölçülmesinde Şekil 4.12’de görülen, teknik özellikleri Tablo 4.5’de verilen VLT 2600S tipi duman ölçüm cihazı kullanılmıştır. Cihaz duman miktarını K faktörü ve yüzde (%) olarak ölçebilmektedir.



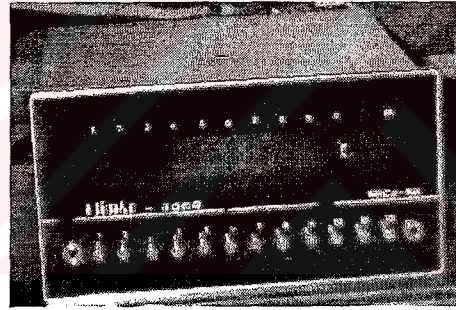
Şekil 4.12. Duman ölçüm cihazı (VLT 2600S).

Tablo 4.5. Duman ölçer teknik özellikleri (VLT 2600S).

Ölçülen Parametre	Ölçüm Aralığı	Hassasiyet
K faktörü (M^{-1})	0-10	$\pm 0,01$
Duman yoğunluğu (%)	0-99	$\pm 0,01$
Motor devri (devir/dakika)	0-9999	1

4.1.5.5. Sıcaklık göstergesi

Deneyler sırasında ortam sıcaklığı, soğutma suyu giriş ve çıkış sıcaklığı, egzoz gaz sıcaklığının ölçülebilmesi için NiCr-Ni tip termokapıllar kullanılmış ve bunlar Elimko marka 12 kanallı bir sıcaklık göstergesine bağlanmıştır (Şekil 4.13). Ölçümlerden önce termokapıllar sıcaklığı bilinen suyun içerisine daldırılıp kontrol edilmiştir.



Şekil 4.13. Sıcaklık göstergesi (ELİMKO).

4.1.5.6. Kronometre

Yakıt tüketiminin belirlenmesinde zaman ölçümleri Robic Sports SC 700 marka, dijital göstergeli ve 0,01 s hassasiyetindeki kronometre ile yapılmıştır.

4.2. Yöntem

Deneylere başlamadan önce supap ayarları kontrol edilerek, enjektör püskürtme basıncı 200 bar'a ayarlanmıştır. Enjeksiyon pompası referans değerlerine göre ayarlanmıştır. Motor çalıştırılmadan önce soğutma kulesi şebeke suyu ile tamamen

doldurulmuştur. Ölçümlere başlamadan önce motor orta hızlarda ve yüklerde çalıştırılarak motorun rejime girmesi sağlanmıştır. Motor çalışma sıcaklığına ulaştıktan ve istenilen hız ve yük konumuna getirildikten sonra kronometreden bir dakika süreyle tüketilen yakıt miktarı ölçülmüştür. Emisyon ölçümü sırasında cihazların propları ölçüm yerine takıldıktan sonra HFK değeri sabitlenene kadar beklenmiş, sabitlendikten sonra veriler kaydedilmiştir.

Motorun performans haritasının çizilmesi amacıyla tam yük değişik devir testleri ile sabit devir değişik yük testleri yapılmıştır. Tam yük deneyleri 1100, 1200, 1400, 1600, 1800, 2000, 2200, 2400, 2600, 2800 devir/ dakika'da gerçekleştirilmiştir. Sabit devir değişik yük testlerinde ise ölçümler aynı devirlerde motor döndürme momenti 40, 80 120, 160, 200 ve 240 Nm iken gerçekleştirilmiştir. Yakıt olarak önce motorin kullanılmış ve motorun standart değerleri belirlenmiştir. Sonra üretilen biyodizel yakıtı aynı şartlarda motorda denenmiştir. Böylece deneylerin ilk aşaması tamamlanarak motorun sökülmesine geçilmiştir. Motorun silindir kapağı ve supapları termal bariyer amaçlı olarak kaplandıktan sonra yerlerine takılmıştır. Dinamometre, egzoz emisyon ölçüm cihazları ve termokapıların kalibrasyonları yeniden yapılmıştır. Gerekli ayar ve kontrol işlemleri tamamlandıktan sonra her iki yakıt için aynı deneyler tekrarlanmıştır. Sonuçlar grafik haline getirilerek, karşılaştırmalı olarak incelenmiştir.

4.3. Hesaplama Yöntemleri

Motordan ölçüm yoluyla elde edilen verilerle efektif güç, özgül yakıt tüketimi, hacimsel verim, karışımın ısı değeri ve efektif verim değerleri hesaplanmıştır.

4.3.1. Efektif güç

Efektif gücün (P_e) hesaplanmasında aşağıdaki denklem (4.1) kullanılmıştır [100] :

$$P_e = \frac{M_d \times n}{9549} \quad (4.1)$$

P_e = Efektif güç (kW)

M_d = Döndürme momenti (Nm)

n = Motor devri (devir/dakika)

4.3.2. Özgül yakıt tüketimi

Özgül yakıt tüketiminin (b_e) hesaplanmasında (4.2) no'lu denklemden yararlanılmıştır [100] :

$$b_e = \frac{\dot{m}_y}{P_e} \quad (4.2)$$

b_e = Özgül yakıt tüketimi (g/kWh)

\dot{m}_y = Yakıt tüketimi (gram/saat)

4.3.3. Hacimsel verim

Motordan ölçüm yoluyla belirlenen hava tüketim değerleri Ek C'de verilmiş olan Hava Akış Ventüri Tablosu kullanılarak kg/saat'e dönüştürülmüş ve aşağıdaki denklemden (4.3) yerine konularak hesaplanmıştır [101].

$$\eta_v = \frac{\dot{m}_h}{\rho_h \times V_h \times n \times i} \quad (4.3)$$

n = Çevrim oranı (çevrim/devir; dört zamanlı motor için 1/2)

\dot{m}_h = Kütleli hava debisi (kg/s)

ρ_h = Atmosferik hava yoğunluğu (kg/m³)

V_h = Kurs hacmi (m³)

n = Motor devri (devir/saniye)

Hava yoğunluğunun belirlenmesinde (4.4) no'lu denklem kullanılmıştır.

$$\rho_h = \frac{P_0}{R \times T_0} \quad (4.4)$$

P_0 = Standart atmosfer basıncı (101 kPa)

T_0 = Standart atmosfer sıcaklığı (298 K)

R = Hava için gaz sabiti (0,287 kJ/kgK)

4.3.4. Karışımın ısı değeri

Karışımın ısı değeri denklem (4.5) ile hesaplanmıştır [29] :

$$H_k = \frac{H_u}{\lambda \times V_{hmin}} \quad (4.5)$$

H_k = Karışımın alt ısı değeri (kJ/kg)

H_u = Alt ısı değeri (kJ/kg)

λ = Hava fazlalık katsayısı

$V_{hmin} = 1 \text{ m}^3$ yakıtın yanabilmesi için gereken minimum hava miktarı (m^3 hava/ m^3 yakıt)

4.3.5. Efektif verim

Efektif verimin belirlenmesinde (4.6) no'lu denklem kullanılmıştır [101] :

$$\eta_e = \frac{3,6 \times 10^6}{b_e \times H_u} \quad (4.6)$$

BÖLÜM 5. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

Düşük ısı kayıplı motorda, biyodizel kullanımının performans ve emisyonlara olan etkisinin kapsamlı bir şekilde incelenebilmesi için motor, hem tam yük değişik devirlerde (1100, 1200, 1400, 1600, 1800, 2000, 2200, 2400, 2600, 2800 devir/dakika) hem de sabit devir değişik yüklerde (40, 80, 120, 160, 200, 240 Nm) denenmiş, elde edilen sonuçlar grafikler halinde verilmiştir.

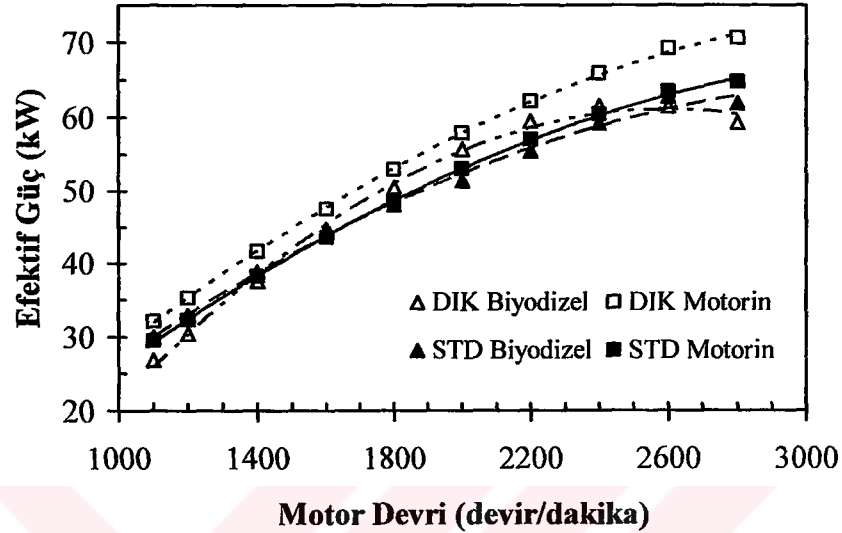
5.1. Tam Yük Değişik Devir Deneyleri

Standart (STD) ve düşük ısı kayıplı (DIK) motorda motorin ve biyodizel ile gerçekleştirilen tam yük değişik devir deneyleri sonucunda her bir durum için (STD motorin, STD biyodizel, DIK motorin ve DIK biyodizel) motor devrine bağlı olarak efektif güç, döndürme momentini, özgül yakıt tüketimi, egzoz gazı sıcaklığı, hacimsel verim, karışımın ısı değeri, efektif verim, hava fazlalık katsayısı, duman koyuluğu, NO_x ve CO₂ emisyonunun değişimleri Şekil 5.1 - 5.11'de grafikler halinde verilmiştir.

5.1.1. Efektif güç

Motor devrine bağlı olarak her bir durum için efektif motor gücündeki değişim Şekil 5.1'de görülmektedir. Genel olarak motor devri arttıkça motor gücü de artmaktadır. Efektif güç STD biyodizel için 1800 devir/dakika'ya kadar, STD motorine göre % 2'ye varan oranlarda artmaktadır. 1800 devir/dakika'dan sonra ise efektif güç giderek azalmakta, 2800 devir/dakika'da yaklaşık % 4,5'a ulaşmaktadır. DIK biyodizel için efektif güçteki azalma, 1400 devir/dakika'dan düşük devirlerde, STD motorine göre, % 6'ya kadar ulaşmaktadır. Bu azalma, düşük devirlerde daha belirgindir. Efektif motor gücü 1400 devir/dakika'dan sonra ise artmakta, 2000 devir/dakika'da bu artış

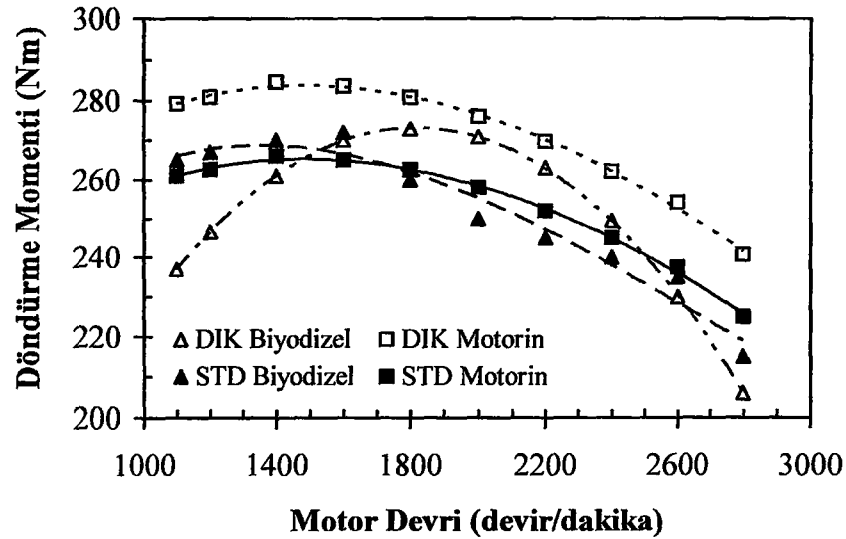
yaklaşık % 5'e ulaşmaktadır. 2400 devir/dakika'dan sonra ise efektif motor gücü tekrar azalmaktadır (ortalama % 5,5). DIK motorin için, STD motorine göre tüm devir aralığında efektif güç yaklaşık % 9 artmaktadır.



Şekil 5.1. Motor devrine bağlı olarak efektif motor gücü değişimleri.

5.1.2. Döndürme momenti

Motor devrine bağlı olarak belirlenen döndürme momenti değişimleri Şekil 5.2'de görülmektedir. Motor döndürme momenti genellikle düşük ve orta devirlerde yüksek iken motor devrinin artmasıyla doğal olarak düşmektedir. STD biyodizel için, STD motorine göre 1800 devir/dakika'ya kadar döndürme momentinde yaklaşık % 2 artış görülmekte iken, 1800 devir/dakika'dan itibaren döndürme momenti azalarak, 2800 devir/dakika'da % 4,5 olmaktadır. Altın ve ark. [56]'da tam yük şartlarında STD motorda biyodizel kullanıldığında efektif güç ve döndürme momentinin düşük devirlerde motorine göre artarken orta ve yüksek devirlerde azaldığını belirtmişlerdir. Antolin ve ark. [54] tam yük şartlarında STD bir dizel motorunun biyodizel ile çalışmasında motorine göre düşük devirlerde efektif güçte az bir düşüş olurken, motor devri arttıkça efektif gücün daha fazla azaldığını vurgulamışlardır. Usta ve ark. [102] motorine % 15 biyodizel ilavesi ile efektif güç ve döndürme momentinde yaklaşık % 4,6'lık bir iyileşme olduğunu, fakat karışımdaki biyodizel oranı artışının belir bir seviyeden sonra efektif güç ve döndürme momentinin



Şekil 5.2. Motor devrine bağlı olarak döndürme momenti değişimleri.

azalmasına yol açtığını belirtmişlerdir. Çetinkaya ve ark. [103] kullanılmış kızartma yağlarından elde ettikleri biyodizeli yakıt olarak kullandıkları çalışmalarında efektif güç ve döndürme momentinde motorine göre % 3 ve 5'lik azalma olduğunu belirlemişlerdir. DIK biyodizel için döndürme momenti, STD motorine göre, 1400 devir/dakika'ya kadar ortalama % 5,5 azalmakla birlikte bu oran düşük devirler için daha fazladır. 1600 – 2400 devir/dakika aralığında döndürme momenti artmakta, 2000 devir/dakika için artış % 5'e kadar çıkmaktadır. 2600 devir/dakika'dan itibaren döndürme momenti düşmekte, 2800 devir/dakika'da düşüş % 8,5'e ulaşmaktadır. DIK motorin için döndürme momenti her devir aralığında STD motorine göre yaklaşık % 7 artmaktadır. Hejwowski ve ark. [64] DIK bir dizel motorunda tam yük şartlarında yakıt olarak motorin kullanıldığında, STD motora göre yüksek devirlerde efektif gücün yaklaşık % 8 arttığını belirtmişlerdir. Döndürme momentinin ise düşük devirlerde yaklaşık % 4 azalırken, yüksek devirlerde % 6 arttığını belirterek bu durumun piston tepesinin seramik kaplanması sonucunda yanan gazlardan transfer edilen ısıнын azalması sonucu gaz sıcaklığının yükselmesinden kaynaklandığını vurgulamışlardır. Yaşar [74] ise seramik kaplama sonucu düşük ve orta devirlerde efektif güçte artış olurken, devir artışıyla birlikte efektif güçteki artışın yavaşladığını belirtmiştir. Parlak ve ark. [85] DIK bir dizel motorunda yakıt olarak motorin kullandıkları çalışmada, tam yük şartlarında efektif güç ve döndürme momentinde sırasıyla % 1,6 ve 1,5'lik iyileşme olduğunu belirlemişlerdir.

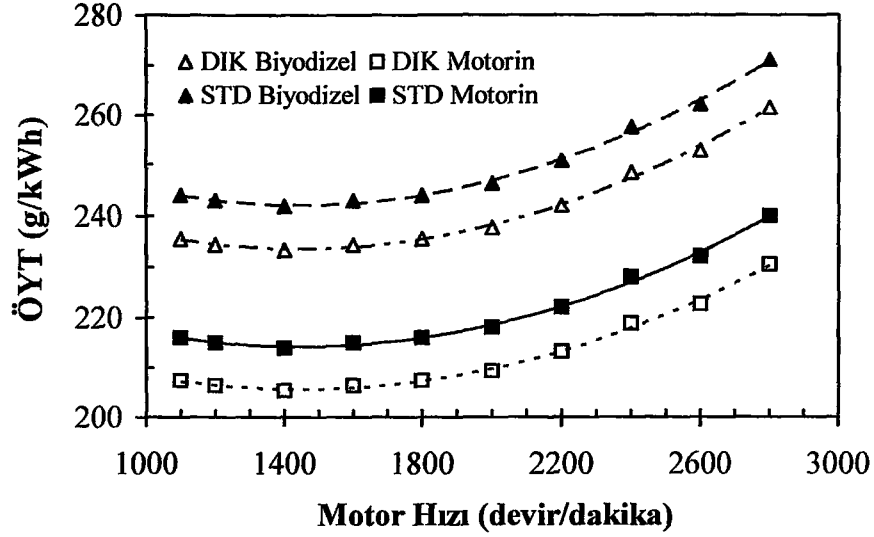
Dizel motorunda püskürtülen yakıtın hava ile karışması makro ve mikro yapıdaki olaylar olarak incelenebilir. Makro karışım yakıt demetinin yanma odası içerisindeki genel dağılımıdır. Yanma odasının her noktasında aynı miktarda yakıt bulunuyorsa, püskürtülen yakıtın homojen olarak dağıldığı kabul edilir. Mikro karışım ise yakıtın parçalanma kalitesini belirlemektedir. Parçalanma kalitesi, ortalama damlacık çapı ve bu ortalama değerden sapma derecesi ile belirtilmektedir. Parçalanmada en önemli etkenin atalet kuvvetleri ile viskoz kuvvetler arasındaki dengenin olduğu belirlenmiştir. Reynolds sayısı ($Re = \rho u^2 D / \mu_g$) ile belirtilen bu oran, yakıtın enjektörden çıkış hızının artışı ile ya da gazın viskozitesinin küçülmesi ile büyümektedir. Ayrıca oluşan damlacıkların daha küçük damlalara ayrılması, atalet kuvvetleri ile yüzey gerilme kuvvetleri arasındaki oranı tanımlayan Weber sayısı ($We = \rho_p u^2 D / \sigma$) ile belirlenmektedir. Yakıtın parçalanması neticesinde oluşan damlacık çapları ne kadar küçük ve bu damlacıkların yanma odasındaki dağılımı ne kadar homojen olursa yakıtın fiziksel olarak hazırlanması ve yanması o derece hızlı ve tam olur [29].

Motor devrine bağlı olarak efektif güç ve döndürme momentindeki değişimlerde aynı faktörler etkili olmaktadır. STD biyodizel için karışımın ısıl değeri STD motorine göre özellikle düşük ve orta devirlerde daha fazla olup, yüksek devirlerde ise bu fark giderek azalmaktadır (Şekil 5.6). Ayrıca biyodizelin yoğunluğunun fazla olması nedeniyle yakıt atomizasyonu, yukarıda belirtilen nedenlere bağlı olarak kötüleşecektir. STD biyodizelin efektif gücü ve döndürme momentinin STD motorine göre düşük devirlerde yüksek, yüksek devirlerde ise düşük olmasının bu durumdan kaynaklandığı düşünülmektedir. Biyodizelde yoğunluğun artışı yakıtın nüfuz (penetrasyon) derinliğini artırdığı, buna karşın viskozitenin yüksek olması yoğunluk/viskozite oranı ölçüsünde, yakıtın atalet kuvvetini artıracığı söylenebilir. Ancak yakıt demetinin parçalanmasını karakterize eden Weber sayısı ($We = \rho_p u^2 D / \sigma$) atalet kuvvetlerinin yüzey gerilimine oranını ifade etmektedir. Biyodizelin yüzey geriliminin yüksek olması Weber sayısını azaltıcı yönde etki etmektedir. Biyodizel yakıtının yanabilir karışım oluşturması açısından değerlendirmek gerekirse, silindire gönderilen yakıtın ataletlerinin artmasına karşın motorine göre yakıtın küçük parçacıklara bölünmesinin zorluğu nedeniyle, yanabilir karışım oluşum kabiliyeti açısından motorine göre daha kötü olacağı söylenebilir. Buna bağlı olarak, özellikle

düşük yük ve devirlerde yanabilir karışım oluşumunun yetersizliği nedeniyle DIK biyodizel için efektif güç ve döndürme momenti STD motorine göre azalmaktadır. Orta devirlerde ise püskürtülen yakıt miktarının artması ile yanma hızının ve türbülansın artmasının efektif güç ve döndürme momentinin iyileşmesine neden olduğu söylenebilir. Yine DIK motorin için, efektif güç ve döndürme momentinin STD motorine göre daha fazla olması, yalıtım neticesinde egzoz gazı sıcaklığının artmasına bağlı enerji artışı nedeniyle turbokompresörün motora daha fazla hava göndermesi dolayısıyla hacimsel verimin artması şeklinde açıklanabilir.

5.1.3. Özgül yakıt tüketimi

Motor devrine bağlı olarak özgül yakıt tüketimi değişimleri Şekil 5.3'de görülmektedir. Genel olarak düşük ve orta devirlerde düşük olan ÖYT motor devri arttıkça artmaktadır. Tüm çalışma aralığı boyunca ÖYT, STD biyodizel için, STD motorine göre ortalama % 13 artmaktadır. Ramadas ve ark. [104] tam yük şartlarında biyodizel ile çalışma sırasında ÖYT'nin motorin kullanıldığı duruma göre % 12'den daha fazla arttığını belirtmişlerdir. Puhan ve ark. [105] ise biyodizel kullanıldığında ÖYT'deki artışın % 20 olduğunu vurgulamışlardır. STD motorine göre ÖYT, DIK biyodizel için ortalama % 9 artarken, DIK motorin için ise yaklaşık % 4 azalmaktadır. Piston ve silindir cidarı ısı iletim katsayısı 0,057 W/m K olan Superni-90 ile kaplanarak DIK duruma getirilmiş bir dizel motorunda pongamia yağını ön ısıtma ile yakıt olarak kullandıkları çalışmalarında, Prasad ve ark. [80] ÖYT'nin STD motorda yakıt olarak motorin kullanıldığı durumdan yaklaşık % 8 daha düşük olduğunu tespit etmişlerdir. Yaşar ve ark. [81] DIK bir dizel motorunda gerçekleştirdikleri deneyler sonucunda ÖYT'de STD motora göre % 6'ya varan oranlarda iyileşme olduğunu belirtmişlerdir. Hazar ve ark. [106] silindir iç yüzeyi, segman ve supapları, fiziksel buhar biriktirme yöntemi ile seramik kapladıkları çalışmalarında, ÖYT tam yük durumunda, orta devirlerde bir miktar iyileştğini vurgulamışlardır. Schwarz ve ark. [84] DIK bir dizel motorunda yaptıkları deneyler sonucunda tam yükte düşük devirlerde ÖYT'de % 3 iyileşme olurken, yüksek devirlerde % 5 kötüleşme olduğunu belirtmişlerdir.



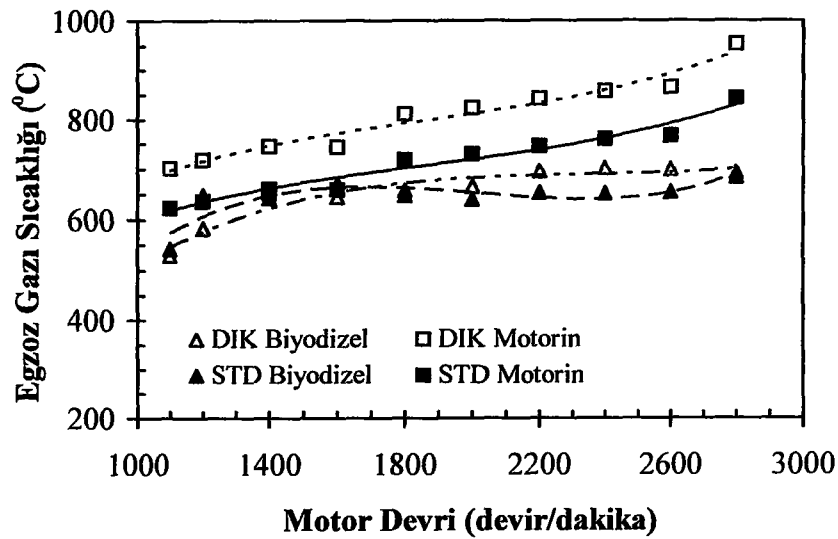
Şekil 5.3. Motor devrine bağlı olarak özgül yakıt tüketimi değişimleri.

STD biyodizel için, ÖYT'nin STD motorine göre daha yüksek çıkmasının sebebi, biyodizelin alt ısıl değerinin motorinden daha düşük olmasıdır. Bu durum, motordan aynı performansı elde edebilmek için daha fazla biyodizel gerektiğini gösterir. DIK motorda ise yalıtım neticesinde artan silindir içi gaz sıcaklıklarının olumlu etkisi sonucu ÖYT, STD Motorin ve STD biyodizele göre azalmaktadır.

5.1.4. Egzoz gazı sıcaklığı

Motor devrine bağlı olarak egzoz gazlarının türbin girişindeki sıcaklık değişimleri Şekil 5.4'te görülmektedir. Genel olarak motor devrindeki artışla birlikte egzoz gaz sıcaklıkları da yükselmektedir. STD biyodizel için, STD motorine göre egzoz gazı sıcaklığında 1100 devir/dakika'da yaklaşık % 12'lik bir azalma varken, devir arttıkça bu fark yaklaşık % 1,5'a kadar (1600 devir/dakika'da) düşmektedir. Bu azalma 1800 devir/dakika'dan itibaren giderek artmakta, 1800 devir/dakika'da yaklaşık % 9,5 olurken, 2800 devir/dakika'da yaklaşık % 19'a ulaşmaktadır. Usta ve ark. [102] yüksek serbest yağ asitlerine sahip bitkisel yağlardan ürettikleri biyodizeli % 25'e varan hacimsel oranlarda motorine karıştırıp yakıt olarak denedikleri çalışmalarında biyodizel karışımlarının egzoz gaz sıcaklıklarını düşürdüğünü belirtmişlerdir. Raheman ve ark. [107] karanja metil esterini tek başına ve motorine değişik oranlarda karıştırarak denemişlerdir. Karışım ve % 100 biyodizel ile çalışmada egzoz

gazı sıcaklıklarının 260-336 °C arasında değişirken, motorin ile çalışma da ise sıcaklıkların 262-335 °C arasında değiştiğini belirtmişlerdir. Çetinkaya ve ark. [108] kullanılmış yemeklik yağlardan elde ettikleri biyodizelin yakıt olarak kullanılmasıyla egzoz gazı sıcaklıklarının azaldığını, 3000 devir/dakika'da motorin için sıcaklıklar 529-519 °C arasında iken, biyodizel kullanıldığında ise 521-517 °C arasında değiştiğini belirtmişlerdir. DIK biyodizel için, STD motorine göre egzoz gazı sıcaklığı 1100 devir/dakika'da yaklaşık % 14,5 azalırken, devir arttıkça bu fark azalmış, 1600 devir/dakika'da ise yaklaşık % 2 olmuştur. Bu noktadan itibaren, fark yeniden artmaya başlayarak 1800 devir/dakika'da yaklaşık % 8 iken, 2800 devir/dakika'da yaklaşık % 18 olmuştur. Prasad ve ark. [80] seramik kaplama ile yenilemez bitkisel yağların egzoz gazı sıcaklıklarının yükseldiğini vurgulamış, ham jatropha yağının ön ısıtma ile kullanıldığında egzoz gazı sıcaklığının motorine göre yaklaşık % 2 yükseldiğini belirlemişlerdir. DIK motorin için ise STD motorine göre tüm devir aralığında egzoz gazı sıcaklığı yaklaşık % 13 yükselmiştir. Hazar ve ark. [106] DIK motordaki egzoz gazı sıcaklıklarının, STD motora göre 48°C'ye kadar yükseldiğini belirtmişlerdir. Parlak ve ark. [95] DIK motordaki egzoz gazı sıcaklıklarının STD motordakinden 65 °C daha fazla olduğunu vurgulamışlardır. Yaşar ve ark. [81] seramik kaplı motorda egzoz gazı sıcaklıklarının STD motora göre % 5-13 yükseldiğini tespit etmişlerdir.



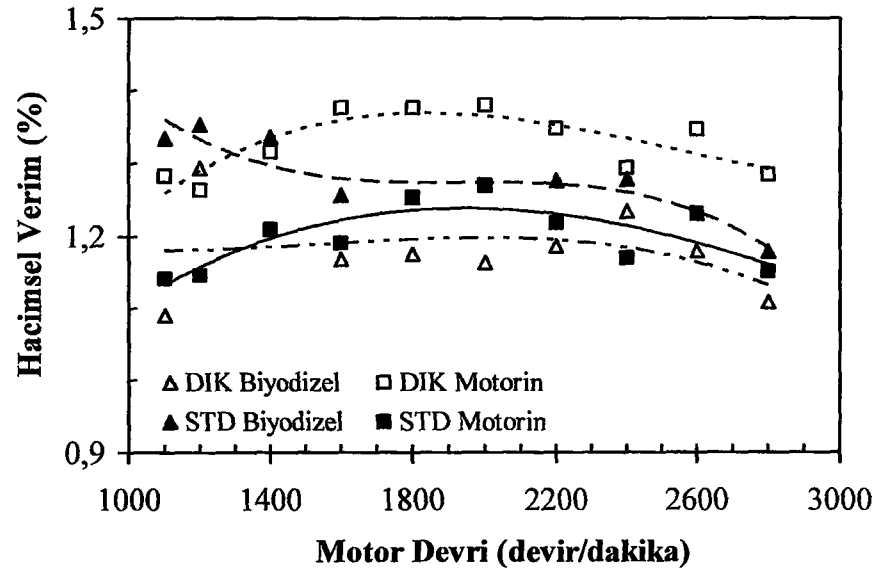
Şekil 5.4. Motor devrine bağlı olarak egzoz gazı sıcaklıkları değişimleri.

Biyodizelin alt ısıl değerinin dizel yakıtına göre yaklaşık % 14 daha düşük olması yüzünden STD biyodizelin egzoz gazı sıcaklığı da STD motorine göre daha az olmaktadır. DIK motorda yalıtım neticesinde artan sıcaklıklar egzoz gazı sıcaklığını artırsa da özellikle yüksek devirlerde biyodizelin alt ısıl değerinin düşük olması sebebiyle egzoz gazı sıcaklığındaki artış da sınırlı olmaktadır.

5.1.5. Hacimsel verim

Motor devrine göre belirlenen hacimsel verim değişimleri Şekil 5.5'de görülmektedir. Genel olarak artan motor devriyle birlikte hacimsel verim azalmaktadır. STD biyodizel için, STD motorine göre 1100-1600 devir/dakika aralığında ortalama % 12'lik, 1800-2800 devir/dakika aralığında ise ortalama % 3'lük bir iyileşme olmuştur. DIK biyodizel için 1100-1400 devir/dakika aralığında ortalama % 2,5'lik bir artış olurken, 1600-2800 devir/dakika aralığında ortalama % 3'lük bir azalma gerçekleşmiştir. Isı kayıpları % 75 oranında azaltılmış bir dizel motorun silindir cidar sıcaklıklarının STD motora göre 200-300 °C arasında yükseldiği Kawamura ve ark. [88] tarafından tespit edilmiştir. DIK motorin için ise tüm çalışma aralığında STD motorine göre ortalama yaklaşık % 10'luk artış gözlenmiştir. Aşırı doldurmalı, direkt püskürtmeli bir DIK dizel motorunda hacimsel verimin, STD motora göre % 3'e varan oranlarda iyileştiği Yaşar ve ark. [81] tarafından da vurgulanmıştır. Parlak ve ark. [95] aşırı doldurmalı bir DIK dizel motorunun hacimsel veriminin % 1-3 arasında artarken, egzoz gazlarının kullanılabilir enerjisinin % 27'ye varan oranlarda yükseldiğini belirtmişlerdir. Doğal emişli DIK dizel motorlarında ise hacimsel verimin % 3-11 arasında kötüleştiği belirtilmektedir [71,84,90].

STD biyodizel durumunda hacimsel verimdeki artışın, biyodizelin alt ısıl değerinin, motorine göre daha düşük olmasından kaynaklandığı sanılmaktadır. Alt ısıl değerinin düşük olması silindir içerisinde yanma sıcaklığının düşük olmasına neden olur. Bu durum emme hattındaki sıcaklığın STD motorine göre düşmesine bağlı olarak hacimsel verimi iyileştirmektedir. Burada grafik olarak verilmemekte birlikte tam yük şartlarında STD motorin için emme hattındaki hava sıcaklığı 54-99 °C arasında olurken, STD biyodizelde 44-86 °C arasında ölçülmüştür. DIK biyodizel durumunda



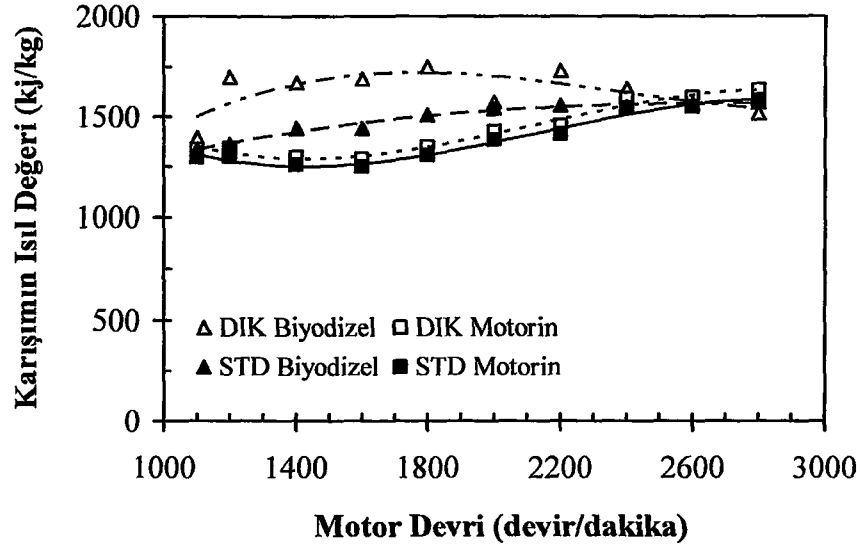
Şekil 5.5. Motor devrine bağlı olarak hacimsel verim değişimleri.

ise yalıtım neticesinde artan cidar sıcaklıklarının giriş havasını ısıtması ve egzoz gazı sıcaklığının düşük olması sonucu (STD motorine göre) hacimsel verimin kötüleştiği düşünülmektedir. Diğer bir anlatımla emme hattındaki sıcaklığın artmasıyla beraber hava yoğunluğu azalmakta, egzoz gazı sıcaklığının düşük olması sonucunda da bu durumu karşılayabilecek seviyede turbokompresörden hava gönderilemeyeceğinden hacimsel verim STD motorine göre düşmektedir. DIK motorin için hacimsel verimdeki iyileşmenin ise yalıtım sonucu artan egzoz gazı sıcaklığına bağlı olarak turbokompresörden motora daha fazla hava gönderilmesi şeklinde açıklanabilir.

5.1.6. Karışımın ısı değeri

Motor devrine bağlı olarak karışımın ısı değeri değişimleri Şekil 5.6'da görülmektedir. Tüm devir aralığında STD biyodizel, DIK biyodizel ve DIK motorin için karışımın ısı değerlerinde STD motorine göre sırasıyla ortalama % 7.5, % 18 ve % 4 artışlar görülmüştür.

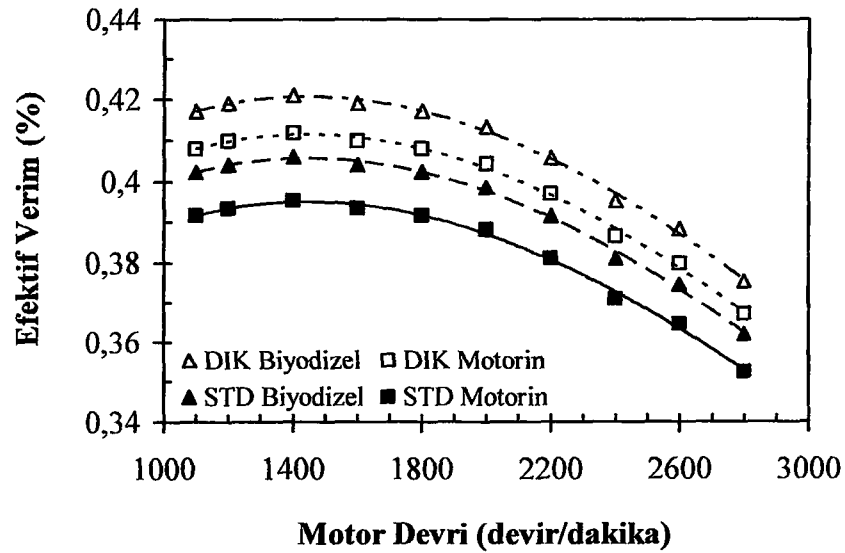
Biyodizelin alt ısı değerinin düşük olması ve teorik tam yanma için gereken hava miktarının motorine göre daha az olması nedeniyle biyodizel kullanıldığında (STD ve DIK motor için) karışımın ısı değeri artmaktadır.



Şekil 5.6. Motor devrine bağlı olarak karışımın ısı değeri değişimleri.

5.1.7. Efektif verim

Her bir durum için efektif verimin motor devrine göre değişimi Şekil 5.7’de görülmektedir. Genelde efektif verim düşük ve orta devirlerde yüksek iken motor devrinin artmasıyla beraber düşmektedir. STD biyodizel, DİK biyodizel ve DİK motorin için, STD motorine göre efektif verimde tüm devirler için sırasıyla yaklaşık % 3, 6.5 ve 4 artış olmuştur.



Şekil 5.7. Motor devrine bağlı olarak efektif verim değişimleri.

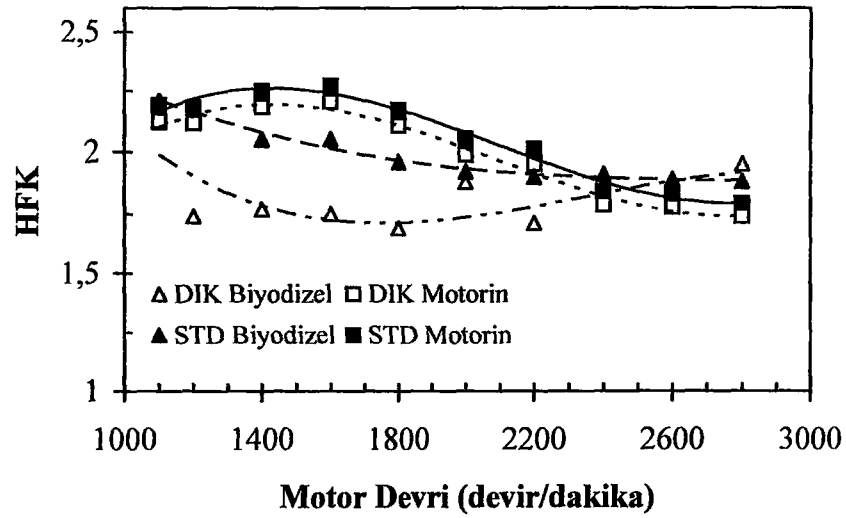
Usta ve ark. [109] fındık yağı rafinasyon işleminin yan ürünü olan sabun stoğu ile atık ayçiçek yağı karışımlarından ürettikleri biyodizel yakıtının, motorine % 17,5 oranında katılması ile deney motorunun ısıl veriminin arttığını belirtmişlerdir. Usta [110] tütün tohumu yağından ürettiği biyodizel yakıtı, % 25'e varan oranlarda motorine karıştırarak aşırı doldurmalı endirekt püskürtmeli bir dizel motorunda denemiştir. Deneyler sonucunda karışım yakıtların ısıl veriminin motorine göre yükseldiğini vurgulamıştır. Parlak ve ark. [85] aşırı doldurmalı tek silindirli DIK bir dizel motorunda yaptıkları deneyler sonucunda ısıl verimde % 1,5'a varan oranlarda iyileşme olduğunu belirlemişlerdir. Aşırı doldurmalı, direkt püskürtmeli, altı silindirli bir dizel motorunun DIK duruma getirilmesi ile fren ısıl veriminde % 2 oranında iyileşme olduğu Parlak ve ark. [95] tarafından bildirilmiştir.

STD biyodizelin efektif veriminin STD motorine göre fazla olmasının sebebinin, düşük devirlerde efektif güç ve döndürme momentinin yükselirken, yüksek devirlerde ise fazla kötüleşmemesinden kaynaklanmaktadır. Yakıtların alt ısıl değerleri arasında % 14'lük bir fark olmasına rağmen biyodizel kullanıldığında efektif güç ve döndürme momentinin en fazla % 4,5 azalması efektif verimin artmasına yol açmıştır. DIK motorda ise özgül yakıt tüketimlerinin azalması efektif verimde iyileşmeye yol açmıştır.

5.1.8. Hava fazlalık katsayısı

Her bir durum için motor devrine bağlı olarak HFK değişimleri Şekil 5.8'de verilmiştir. Genel olarak motor devrinin artmasıyla HFK'da azalmaktadır. STD biyodizel için, STD motorine göre HFK 2200 devir/dakika'ya kadar ortalama % 5,5 azalmaktadır. DIK biyodizel için, STD motorine göre HFK tüm devir aralığında ortalama % 10 azalırken, fark düşük ve orta devirlerde daha fazladır. DIK motorin için ise STD motorine göre tüm çalışma aralığında HFK % 3 daha az olmuştur.

Biyodizelin alt ısıl değerinin düşük olması sebebiyle, motorinle aynı performansı sağlayabilmesi için silindirlere daha fazla biyodizel gönderilmesi gerekir. Bu ise biyodizel kullanıldığında özellikle düşük ve orta devirlerde HFK'nın azalmasına yol açmaktadır.



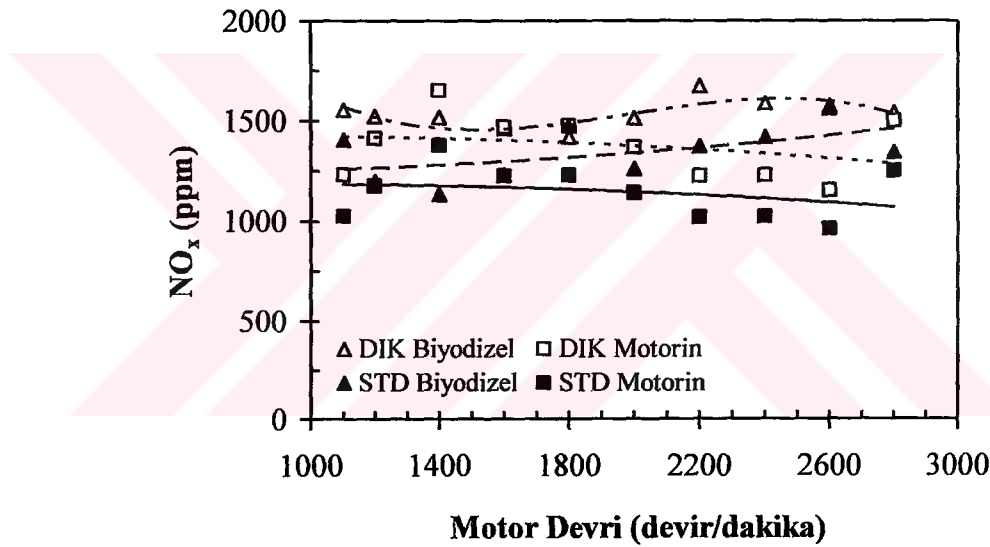
Şekil 5.8. Motor devrine bağlı olarak HFK değişimleri.

DIK motorda artan sıcaklıklar, enjeksiyon sistemindeki yakıtı ısıtmaktadır. Enjeksiyon pompası enjektörlere motorun ihtiyacından fazla yakıt gönderdiğinden fazla yakıt enjektörlerden depoya geri dönmekte ve buradaki yakıtı da ısıtmaktadır. Bu durumun ise depodaki yakıtın viskozitesini düşürüp silindirlere daha fazla yakıt gönderilmesine yol açtığı düşünülmektedir.

5.1.9. Azot oksit emisyonu

Şekil 5.9'da motor devrine bağlı olarak NO_x emisyonu değişimleri görülmektedir. Motor devrinin artmasıyla birlikte yakıt olarak motorin kullanıldığında NO_x emisyonu genellikle azalırken, biyodizel kullanıldığında NO_x emisyonu artmaktadır. STD biyodizel için, STD motorine göre 1100 devir/dakika'da NO_x emisyonu yaklaşık % 37 artarken, 1600 devir/dakika'da NO_x emisyonu her iki durum için hemen hemen aynı kalmaktadır. NO_x emisyonundaki artış 1800-2600 devir/dakika arasında artarak devam etmiş, 2600 devir/dakika'da STD motorine göre NO_x emisyonundaki artış % 60'a ulaşmıştır. Çanakçı [111] soya yağından ürettiği biyodizel yakıtının dört silindirli, aşırı doldurmalı, direkt püskürtmeli bir dizel motorunun NO_x emisyonunu motorine göre % 13 artırdığını vurgulamıştır. Usta [112] tütün tohumu yağından ürettiği biyodizeli motorine % 10, 17,5 ve 25 oranlarında karıştırarak dört silindirli, aşırı doldurmalı indirekt püskürtmeli bir dizel motorunda test etmiştir. Testler sonucunda karışım yakıtların NO_x emisyonunu % 5'e

varan oranlarda yükselttiğini belirtmiştir. DIK biyodizel için 1100 devir/dakika'da, STD motorine göre, NO_x emisyonundaki artış yaklaşık % 50 iken, bu oran 1800 devir/dakika'da yaklaşık % 15'e kadar düşmektedir. Bu noktadan itibaren devir arttıkça NO_x emisyonu da artmakta, 2600 devir/dakika'da fark yaklaşık % 63'e kadar çıkmaktadır. DIK motorin için ise STD motorine göre NO_x emisyonu tüm çalışma bölgesinde % 20 daha fazla olmaktadır. Prasad ve ark. [80] seramik kaplama sonucu yenilemez bitkisel yağların NO_x emisyonunun, STD motora göre % 30'a varan oranlarda arttığını belirtmişlerdir. Uzun ve ark. [83] altı silindirli, aşırı doldurmalı, direkt püskürtmeli bir dizel motorunun ürettiği NO_x emisyonunun seramik kaplama ile arttığını belirtmişlerdir.



Şekil 5.9. Motor Devrine bağlı olarak NO_x emisyonu değişimleri.

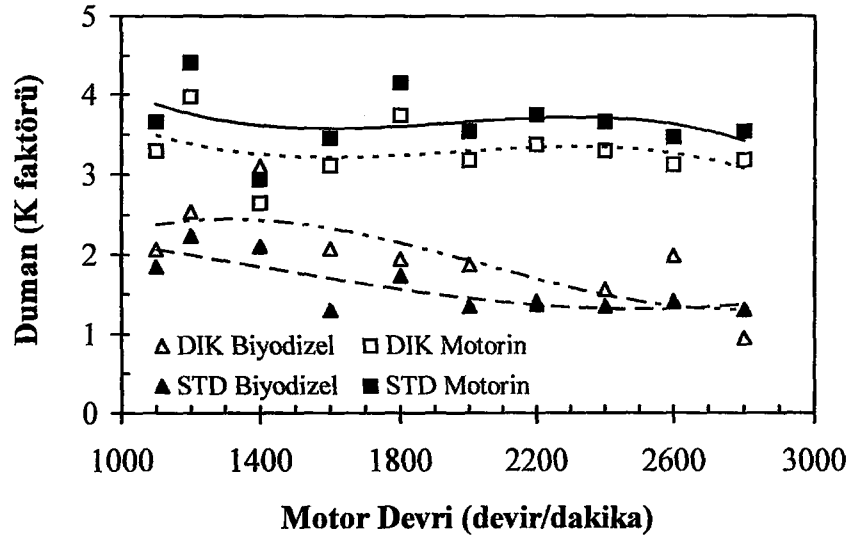
Hem STD hem de DIK biyodizel için NO_x emisyonunun motorine göre artması şu şekilde açıklanabilir; sıcaklık ve HFK, NO_x emisyonuna etki eden önemli iki parametredir. $\text{HFK} = 1$ 'e yaklaştıkça alev sıcaklığının artması sonucu NO_x emisyonu da artmaktadır. Önceden açıklandığı gibi biyodizelin alt ısıl değerinin düşük olması sebebiyle motorinle aynı performansı elde edebilmek için silindirlere daha fazla biyodizel püskürtülmesi gereklidir. Bu durum ise biyodizel kullanıldığında HFK'nın motorine göre azalmasına, buna bağlı olarak da NO_x emisyonunun artmasına yol açmaktadır. DIK motorda ise yalıtım neticesi artan sıcaklıkların alev civarında

bölgesel yüksek sıcaklık noktaları oluşturması [78] ve HFK'nın azalması NO_x emisyonunu daha da artırmaktadır.

5.1.10. Duman koyuluğu

Motor devrine göre duman koyuluğu değişimleri Şekil 5.10'da görülmektedir. Genelde duman koyuluğu düşük ve orta devirlerde fazla olurken, yüksek devirlerde azalmaktadır. STD biyodizel için, STD motorine göre duman koyuluğu 1400 devir/dakika'ya kadar ortalama % 40, 1600-2800 devir/dakika aralığında ise ortalama % 60 azalmaktadır. Çanakçı [111] biyodizel ve karışımlarının motorine göre duman emisyonu azalttığını vurgulayarak aşırı doldurmalı, direkt püskürtmeli, dört silindirli bir dizel motorunun 1400 devir/dakika'daki duman emisyonunun soya yağı metil esteri kullanılması ile yaklaşık % 63 azaldığını belirlemiştir. Altıparmak ve ark. [108] ayçiçek yağından elde ettikleri biyodizelin tek silindirli direkt püskürtmeli bir dizel motorunun duman emisyonunu tam yük şartlarında % 40-61,5 arasında düşürdüğünü tespit etmişlerdir. Çetinkaya ve ark. [108] kullanılmış kızartma yağından ürettikleri biyodizelin tek silindirli direkt püskürtmeli bir dizel motorunun duman emisyonunu tam yük şartlarında % 40-55 arasında azalttığını belirtmiştir. DIK biyodizel için, STD motorine göre, duman koyuluğundaki azalma 1400 devir/dakika'ya kadar ortalama % 30, 1600-2800 devir/dakika aralığında ortalama % 53 olmaktadır. Prasad ve ark. [80] seramik kaplama sonucu yenilemez bitkisel yağların duman emisyonunun motorine göre iki kata kadar varan oranlarda arttığını belirlemişlerdir. DIK motorin için, STD motorine göre her devir aralığında duman koyuluğu yaklaşık % 10 daha az olmaktadır. Kawamura ve ark. [88] direkt püskürtmeli bir dizel motorunun tam yük şartlarında 2500 devir/dakika'daki duman emisyonunun seramik kaplama ile yaklaşık % 50 azaldığını belirlemişlerdir. Alkidas [87] tek silindirli direkt püskürtmeli bir dizel motorunun soğutma sisteminin devre dışı bırakılması ile tam yük şartlarındaki duman emisyonunun önemli miktarda azaldığını belirtmiştir.

Dizel motorları yüksek hava fazlalığı ile çalışmasına rağmen yakıt demetinin merkezinde çok zengin karışım bulunmaktadır. Bu noktadaki yakıt zerrecikleri yeterince oksijen bulamadıklarından partiküllerin oksidasyonu tamamlanamadan

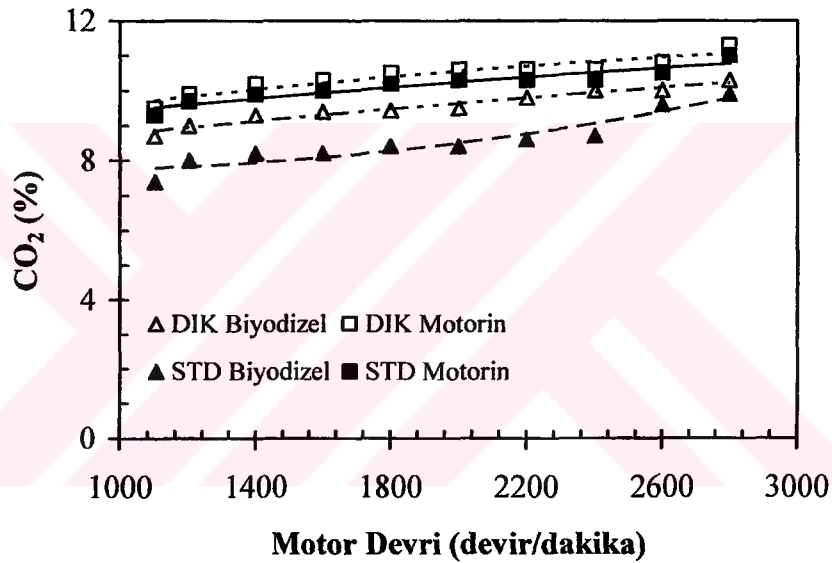


Şekil 5.10. Motor devrine bağlı olarak duman koyuluğu değişimleri.

egzozdan dışarı is (duman) halinde atılmaktadırlar [113]. Biodizelin içerisinde bulunan oksijen sayesinde yakıt zerreciklerinin oksidasyonu iyileştiğinden, STD motorda biodizel kullanıldığında, egzozdaki duman koyuluğu motorine oranla daha az olmaktadır. DIK biodizel durumunda da, STD motorine göre duman koyuluğu azalmaktadır. Fakat bu azalma özellikle düşük ve orta devirlerde, STD biodizel durumuna göre daha az olmaktadır. Bunun sebebinin DIK motordayalıtım neticesinde artan silindir içi gaz sıcaklıklarının tutuşma gecikmesini kısaltması yüzünden olduğu tahmin edilmektedir. Tutuşma gecikmesinin kısa olması sonucunda hava ile yakıt yeterince karışmadan yanma işlemi başlayacağından yakıtın kontrollü yanma periyodundaki oksidasyon hızı yavaşlayacak ve egzozdaki duman koyuluğu artacaktır. DIK motorin için ise, STD motorine göre duman koyuluğunun azalması ise şu şekilde açıklanabilir; yanma esnasında duman oluşumu, difzyon yanması sırasında başlar ve püskürtme süresince duman konsantrasyonu hızla artar. Püskürtme sonunda da maksimum düzeye ulaşır. Daha sonraki safhada duman oksitlenmeye başlar. Ancak alev sıcaklığı düşmeye başladıkça oksitlenme reaksiyonları yavaşlar ve 1400°C'nin altında ise oksidasyon durur. Dolayısıyla is, bu konsantrasyon seviyesinde dışarı atılır [114]. DIK motorda artan silindir içi gaz sıcaklıklarının duman oksidasyon hızının artması sonucu duman koyuluğunun azaldığı düşünülmektedir.

5.1.11. CO₂ emisyonu

Şekil 5.11’de motor devrine bağlı olarak CO₂ emisyonu değişimleri görülmektedir. Genel olarak artan motor devriyle birlikte CO₂ emisyonu da artmaktadır. STD biyodizel için CO₂ emisyonu 1100-2400 devir/dakika aralığında ortalama % 17 azalırken, 2600-2800 devir/dakika aralığında ortalama % 9 azalmıştır. DIK biyodizel için CO₂ emisyonu tüm devir aralığında STD motorine göre ortalama % 6 azalmıştır. DIK motorin durumunda ise tüm devir aralığında CO₂ emisyonu STD motorine göre ortalama % 3 artmıştır.



Şekil 5.11. Motor devrine bağlı olarak CO₂ emisyonu değişimleri.

STD biyodizel için CO₂ emisyonunun, STD motorine göre düşük olması şu şekilde açıklanabilir; yanma sırasında yakıtın içerisindeki karbon ve hidrojen ayrışmakta, hidrojen büyük oranda suya dönüşmektedir. Karbon ise oksidasyon sırasında yeterli oksijen bulması durumunda CO₂'e, bulamaması durumundaysa CO ya da dumana dönüşmektedir. Dolayısıyla duman emisyonundaki değişim CO₂ emisyonunu da etkilemektedir. STD biyodizelin duman koyuluğunun STD motorine göre daha az olması, CO₂ emisyonunu azaltmaktadır. DIK motorda ise efektif verimin yükselmesi sonucu tam yanma ürünü olan CO₂ emisyonunun arttığı söylenebilir.

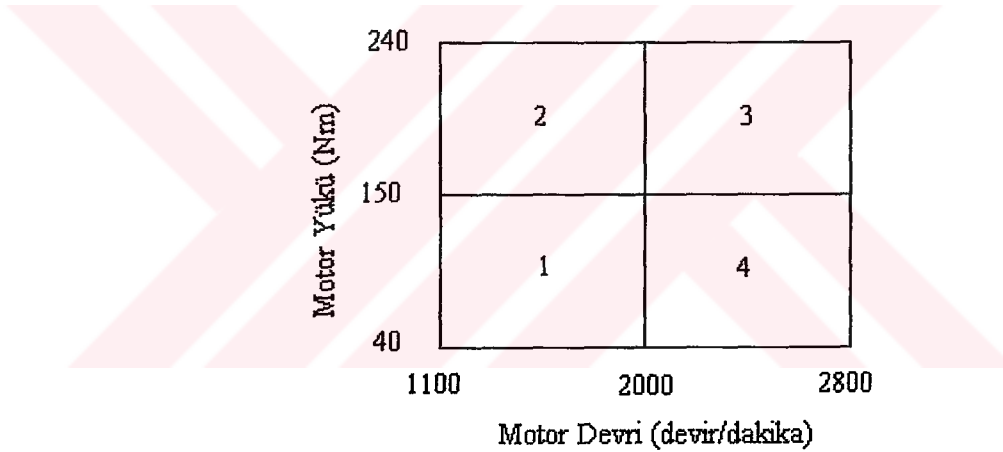
5.2. Sabit Devir Değişik Yük Deneyleri

Tam yük değişik devir testleri bir motor hakkında genellikle yeterli bilgiyi vermektedir. Fakat kapsamlı bir analiz için motorun sabit devir değişik yük (kısmi yük) testlerinin yapılarak, motor performansının, motor devri ve döndürme momentine bağlı olarak değişiminin eş eğriler (performans haritası) ile çizilip karşılaştırılması daha faydalı olacaktır.

Performans haritalarında genel olarak, maksimum motor devrinin yarısının biraz altındaki devirlerde ve kısmen yüksek döndürme momenti değerlerinde, özgül yakıt tüketiminin en düşük olduğu (motor veriminin en yüksek olduğu) bir bölge mevcuttur. Bu bölge tam yükte elde edilen döndürme momenti eğrisindeki maksimum noktanın hafif sol ve alt tarafına düşmekte olup motorun indike ve mekanik verimlerinin en yüksek olduğu bölgedir. Bu bölgenin bulunduğu sabit motor devrinde döndürme momenti değeri optimum değerden daha fazla artırılacak olursa özgül yakıt tüketimi artar. Çünkü optimum döndürme momenti bölgesinde motor devri sabit tutulup döndürme momenti değerinin yükseltilebilmesi için yanma odasına püskürtülen yakıt miktarının artırılması gerekmektedir. Daha yüksek döndürme momenti için yanma odasına püskürtülen yakıt miktarı fazlalığı, HFK'nın düşmesine neden olmakta ve bir kısım yakıt yanmadan dışarı atılmaktadır. Bu durumda hem duman emisyonu hem de özgül yakıt tüketimi artmaktadır. Optimum bölgenin bulunduğu motor devrinde motor devri sabit tutularak motorun yükü azaltılırsa özgül yakıt tüketiminin yine arttığı görülmektedir. Bunun sebebi ise düşük motor devirlerinde yakıt enjeksiyon sistemlerinin gerekli atomizasyonu sağlayamaması ve çevrim başına olan ısı kayıpları yüzünden tatminkar performans elde edilememesi sonucu yakıt tüketiminin artması ve indike verimin azalması olarak gösterilebilir. Optimum yakıt ekonomisinin sağlandığı bölgenin sağına doğru hareket edildiğinde yani motor yükü sabit tutularak motor devri optimum bölgedeki motor devrinden daha yüksek motor devirlerine yükseltildiği zaman özgül yakıt tüketimi yine artmaktadır. Bunun sebebi ise motor devri ile birlikte artan sürtünme kuvvetlerinden dolayı sürtünmeye harcanan gücün artmasına bağlı olarak mekanik verimin azalması ve yanma olaylarındaki kötüleşmedir. Optimum bölgenin solunda aynı döndürme momenti değeri için düşük motor devirlerinde özgül yakıt tüketimi

artmaktadır. Bunun sebebi ise muhtemelen düşük motor devirlerinde yakıt enjeksiyon sistemlerinin gerekli atomizasyonu sağlayamaması sonucu yakıt tüketiminin artmasıdır [115].

Yapılan sabit devir değişik yük testleri neticesinde her bir durum için elde edilen özgül yakıt tüketimi, egzoz gazı sıcaklığı ve efektif verim eş eğrileri STD motorin ile karşılaştırılmalı olarak verilmiştir. Hava fazlalık katsayısı, NO_x , duman koyuluğu ve CO_2 emisyonları ise 1400 ve 2800 devir/dakika için motorun döndürme momentine göre verilmiştir. Deneysel neticesinde elde edilen performans eğrilerinin analizini kolaylaştırmak amacıyla, eğriler dört bölgeye ayrılarak incelenmiştir (Şekil 5.12). Bunlar; (1) düşük devir-düşük yük, (2) düşük devir-yüksek yük, (3) yüksek devir-yüksek yük, (4) yüksek devir-düşük yük bölgeleridir [85].

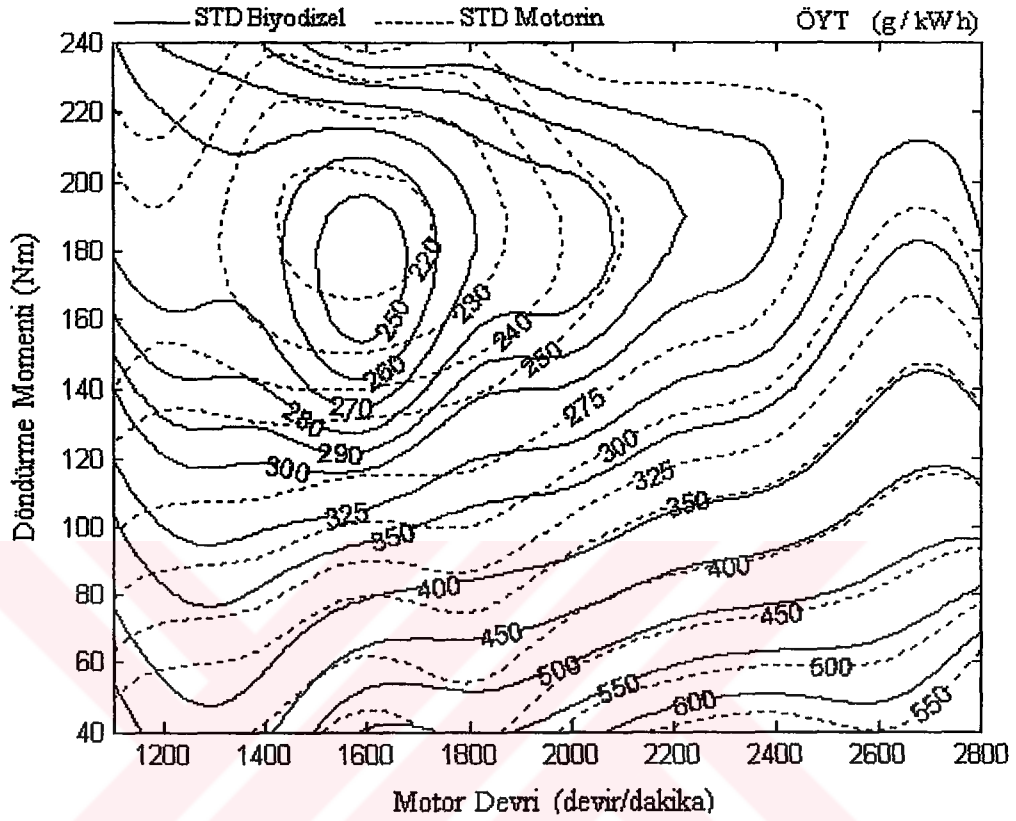


Şekil 5.12. Deney motorunun çalışma bölgeleri.

5.2.1. Özgül yakıt tüketimi

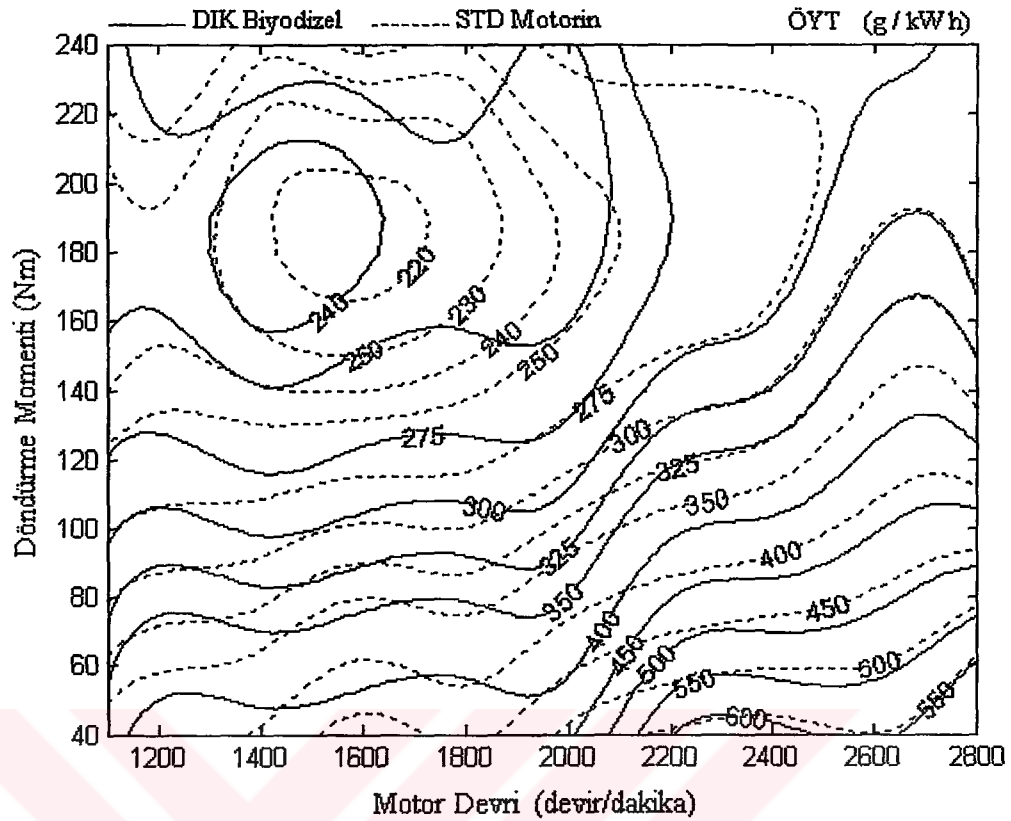
STD biyodizel için eş özgül yakıt tüketimi değişimlerinin STD motorin ile karşılaştırılması Şekil 5.13'de görülmektedir. Yakıt olarak biyodizel kullanıldığında özgül yakıt tüketimi genel olarak artma eğilimindedir. Her iki durum için de en düşük özgül yakıt tüketimi 2. bölgede gerçekleşmiştir. STD motorin için bu bölgedeki en düşük değer 220 g/kWh iken, STD biyodizel için 250 g/kWh olmuştur. ÖYT 1. bölgede 1400 devir/dakika ve 40 Nm'da % 8, 1100 devir/dakika ve 40 Nm'de % 32 artmıştır. 2. bölgede 1200 devir/dakika ve 240 Nm için artış % 2,5

olurken, 1600 devir/dakika ve 240 Nm de % 24'lük bir artış olmuştur. 3. ve 4. bölgelerde ise yaklaşık % 13'lük bir artış gözlenmiştir.



Şekil 5.13. STD biyodizel eş özgül yakıt tüketimi eğrilerinin STD motorin ile karşılaştırılması.

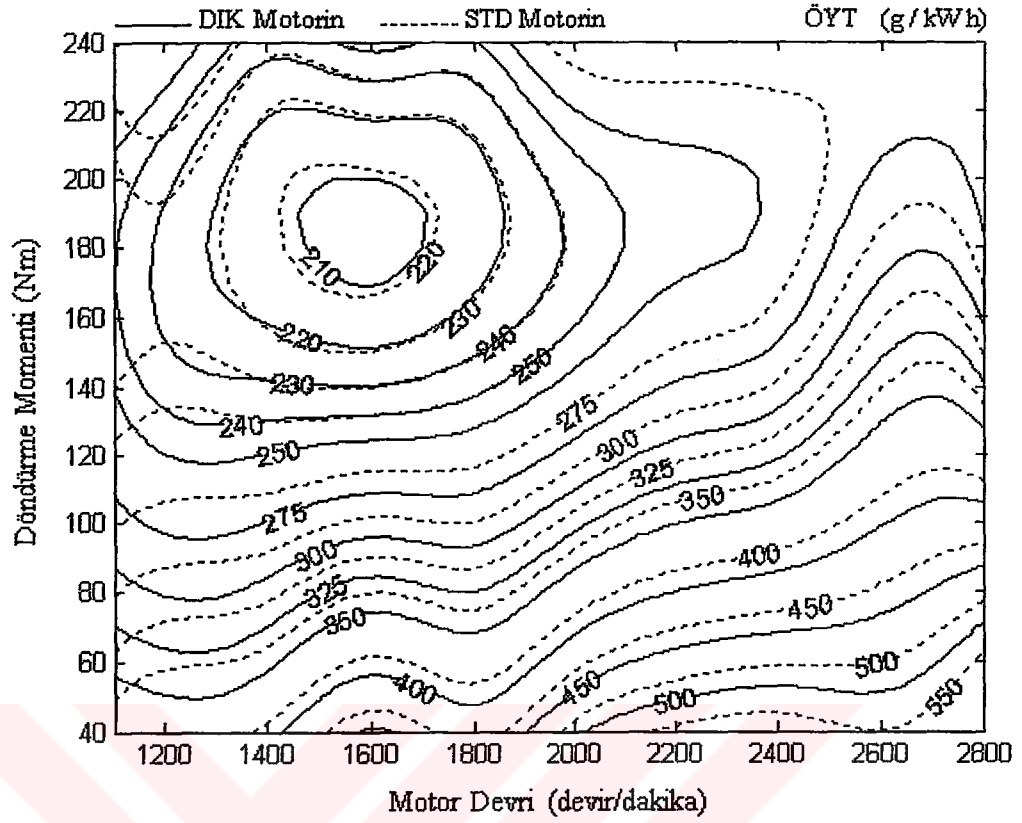
DIK biyodizelin eş özgül yakıt tüketimi eğrilerinin STD motorin ile mukayese edilmiş hali Şekil 5.14'de verilmiştir. DIK biyodizel durumunda özgül yakıt tüketiminde iyileşme gözlenmesine rağmen, STD motorin durumundaki özgül yakıt tüketimi daha az olmuştur. DIK biyodizel için en düşük özgül yakıt tüketimi 2. bölgede 240 g/kWh olarak gerçekleşmiştir. 1. ve 2. bölgelerdeki bazı noktalarda (özellikle 1. bölgede) özgül yakıt tüketiminde azalma gözlenmesine rağmen genelde özgül yakıt tüketiminde artış gözlenmiştir. ÖYT 1. bölgede 1600 devir/dakika ve 40 Nm 'de yaklaşık % 8 azalırken, 1200 devir/dakika ve 80 Nm'de ise yaklaşık % 9,5 artmıştır. 2. bölgede 2000 devir/dakika ve 240 Nm'de yaklaşık % 13 azalırken, 1600 devir/dakika ve 200 Nm'de yaklaşık % 10 artmıştır. 3. ve 4. bölgelerde ise yaklaşık % 8'lik bir artış gözlenmiştir.



Şekil 5.14. DİK biyodizel eş özgül yakıt tüketimi eğrilerinin STD motorin ile karşılaştırılması.

DİK motorinin eş özgül yakıt tüketimi eğrilerinin STD motorin ile kıyaslanmış hali Şekil 5.15'de görülmektedir. Genelde DİK motorin durumunda STD motorin durumuna göre özgül yakıt tüketiminde azalma gerçekleşmiştir. DİK motorin için en düşük özgül yakıt tüketimi 2. bölgede 210 g/kWh olmuştur. DİK motorin durumunda özgül yakıt tüketimi 1. ve 2. bölgelerin düşük devirlerindeki birkaç nokta haricinde genelde azalma eğilimi göstererek tüm bölgelerde yaklaşık % 4 düşmüştür. Schwarz ve ark. [84] DİK bir dizel motorunda yaptıkları deneyler sonucunda ÖYT'de kısmi yüklerde % 8'e varan iyileşmeler olduğunu belirtmişlerdir.

Yakıt olarak biyodizel kullanıldığında tam yük değişik devir testlerinde olduğu gibi ısı değerinin düşük olması neticesinde özgül yakıt tüketimi kısmi yüklerde de artmıştır. Benzer şekilde yalıtım sonucu artan silindir içi gaz sıcaklıklarının pozitif etkisi sonucu DİK motorda her iki yakıt için özgül yakıt tüketimlerinde iyileşme olmuştur.

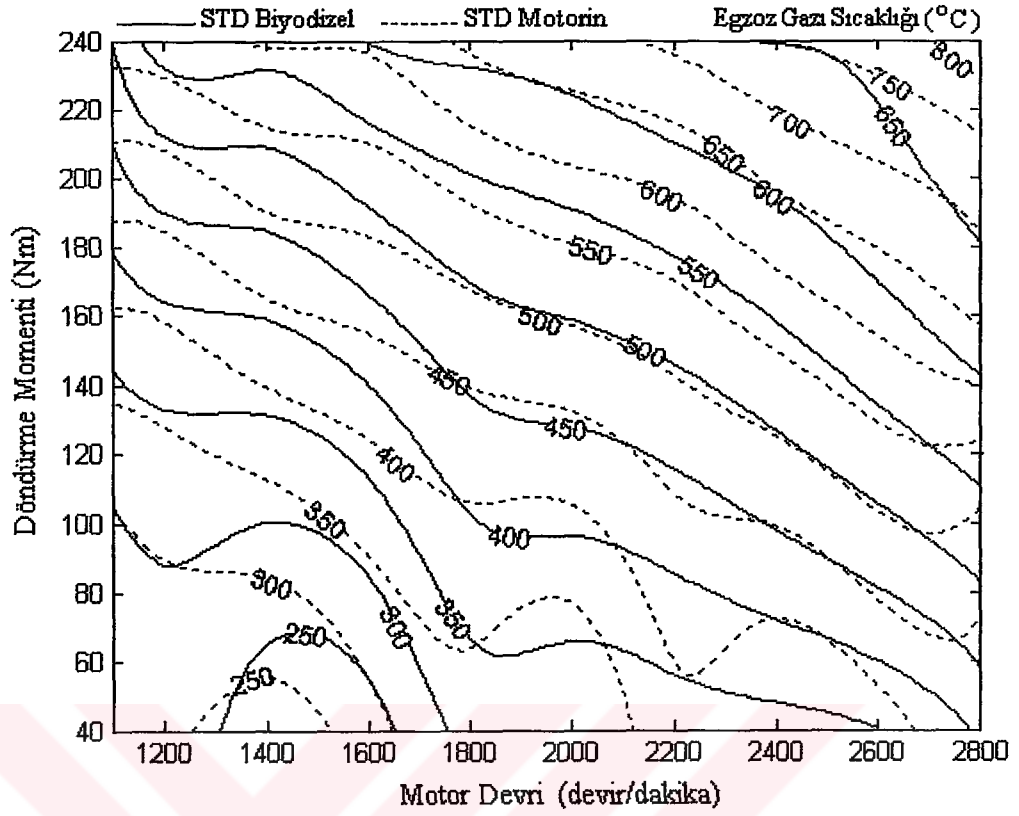


Şekil 5.15. DIK motorin eş özgül yakıt tüketimi eğrilerinin STD motorin ile karşılaştırılması.

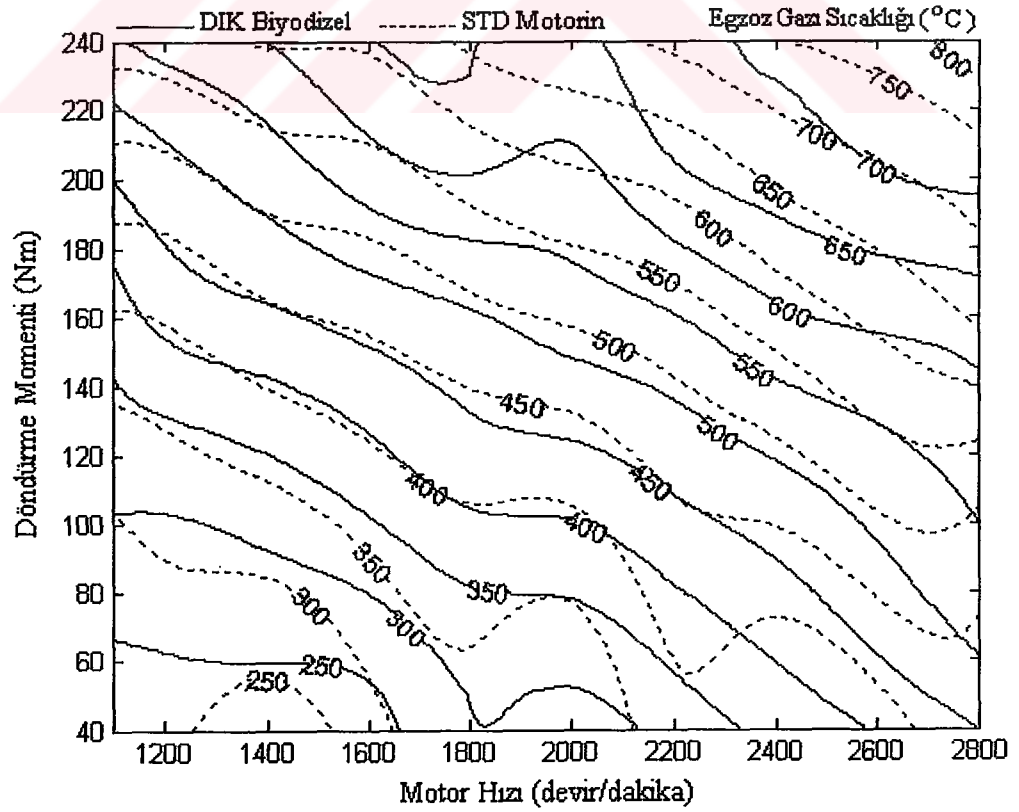
5.2.2. Egzoz gazı sıcaklığı

STD biyodizel ile STD motorinin eş egzoz gazı sıcaklığı eğrileri Şekil 5.16'da verilmiştir. Genel olarak egzoz gazı sıcaklıkları biyodizel kullanılmasıyla azalmıştır. Ancak genel eğilimin aksine 1. bölgede kısmi artış ve azalmalar gözlenmiş; 1600 devir/dakika ve 40 Nm'de egzoz gaz sıcaklığı yaklaşık % 20 azalırken, 1200 devir/dakika ve 40 Nm'de % 7 artmıştır. Egzoz gazı sıcaklığı 2. bölgede 1100 devir/dakika ve 240 Nm'de yaklaşık % 12 düşerken, 2000 devir/dakika ve 160 Nm'de bu oran yaklaşık % 1 olmuştur. 3. bölgede 2400 devir/dakika ve 240 Nm'de yaklaşık % 13, 2200 devir/dakika ve 160 Nm'de yaklaşık % 2 azalmıştır. Buna karşın 4. bölgede 2200 devir/dakika ve 40 Nm'de yaklaşık % 17 azalırken, 2800 devir/dakika ve 80 Nm'de yaklaşık % 8 artmıştır.

DIK biyodizelin eş egzoz gazı sıcaklığı eğrilerinin STD motorin ile karşılaştırılması Şekil 5.17'de görülmektedir. Seramik kaplamanın etkisi sonucu DIK biyodizel durumunda egzoz gaz sıcaklıklarında artış olmakla birlikte, STD motorine göre



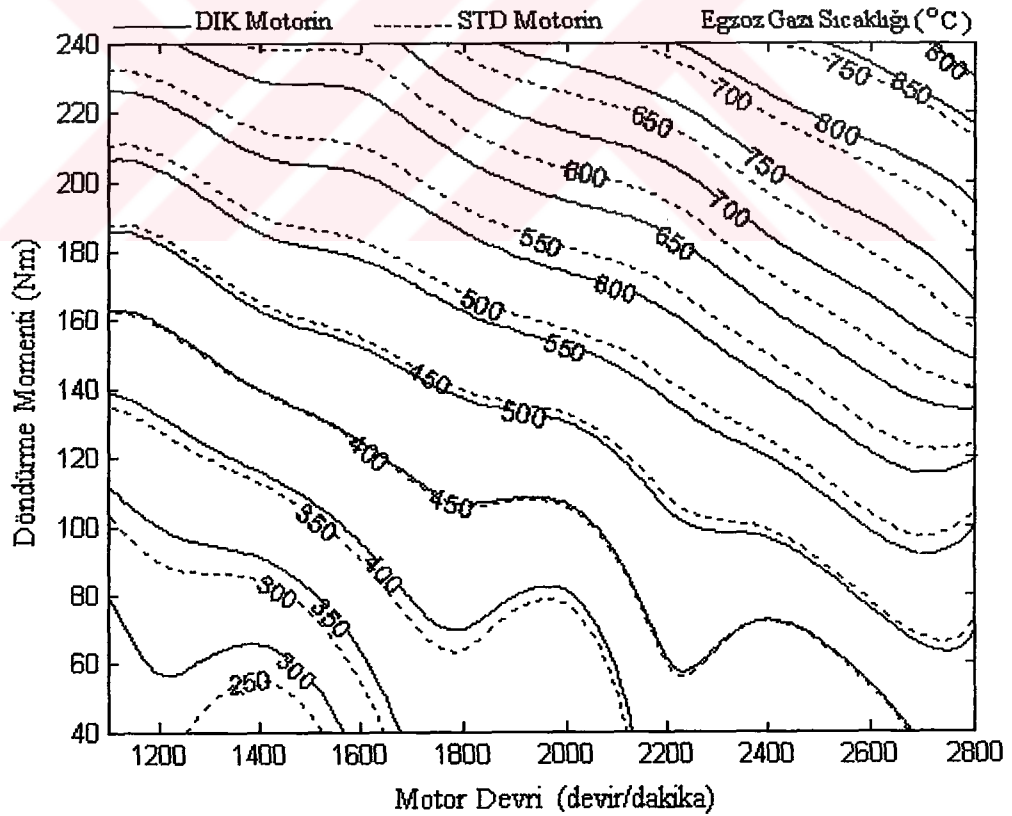
Şekil 5.16. STD biyodizel eş egzoz gazı sıcaklığı eğrilerinin STD motorin ile karşılaştırılması.



Şekil 5.17. DIK biyodizel eş egzoz gazı sıcaklığı eğrilerinin STD motorin ile karşılaştırılması.

sıcaklıklar genelde düşük olmuştur. Egzoz gazı sıcaklığı 1. bölgede 1200 devir/dakika ve 40 Nm'de yaklaşık % 14 azalırken, 2000 devir/dakika ve 120 Nm'de yaklaşık % 3 artmıştır. 2. bölgede 2000 devir/dakika ve 240 Nm'de yaklaşık % 6 azalırken, 1600 devir/dakika ve 200 Nm'de yaklaşık % 7 artış gözlenmiştir. 3. bölgede 2200 devir/dakika ve 200 Nm'de % 4,5'lik artış olmuş, 2800 devir/dakika ve 240 Nm'de ise yaklaşık % 13 azalma gerçekleşmiştir. 4. bölgede sadece 2200 devir/dakika'da 40 ve 80 Nm'de yaklaşık % 11'lik düşüş olurken diğer tüm noktalarda artış gözlenmiştir. 2800 devir/dakika ve 80 Nm'de ise yaklaşık % 15'lik bir yükselme olmuştur.

Şekil 5.18'de DIK motorinin eş egzoz gazı sıcaklığı eğrilerinin STD motorin ile karşılaştırılmış hali görülmektedir. DIK motorin durumunda, STD motorine göre egzoz gaz sıcaklıklarında genel olarak yükselme görülmüştür. Çalışma aralığındaki tüm bölgelerde birkaç nokta haricinde yaklaşık % 12 bir artış gerçekleşmiştir.



Şekil 5.18. DIK motorin eş egzoz gazı sıcaklığı eğrilerinin STD motorin ile karşılaştırılması.

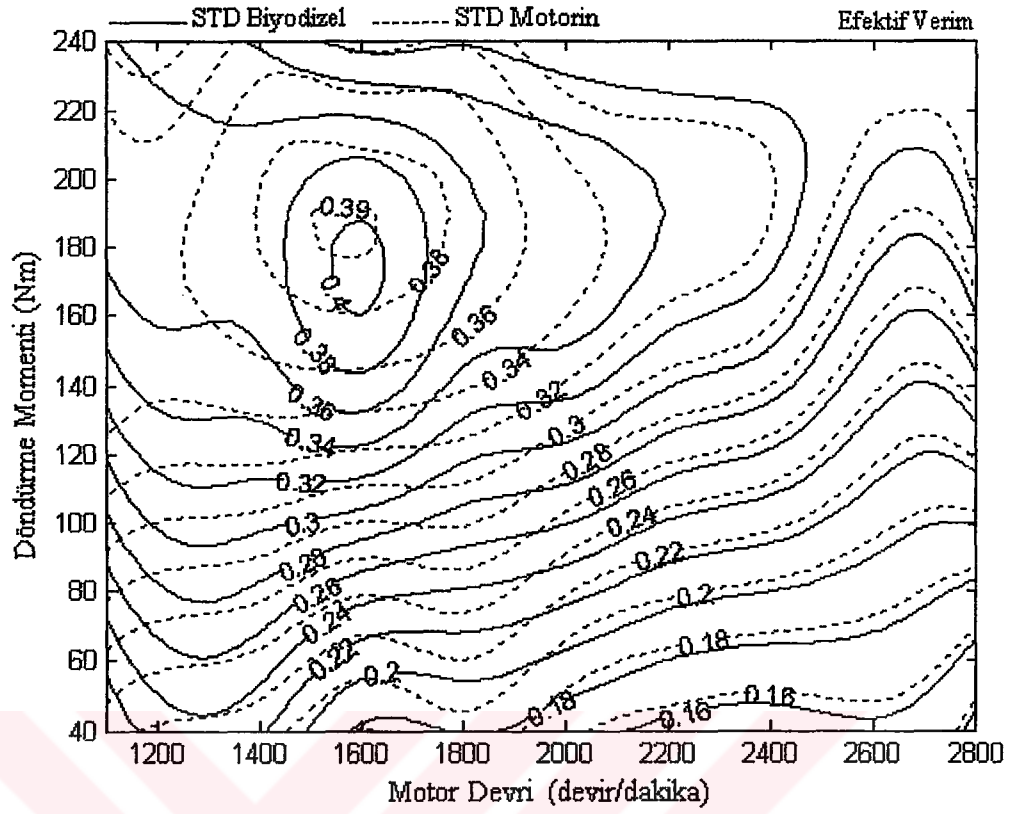
Biyodizelin ısıl değerinin motorine göre daha düşük olmasına bağlı olarak egzoz gaz sıcaklıkları biyodizel kullanıldığı durumlarda düşük olmuştur. Seramik kaplamayla sağlanan yalıtım neticesinde ise DIK motordaki egzoz gaz sıcaklıklarında artış gerçekleşmiştir.

5.2.3. Efektif verim

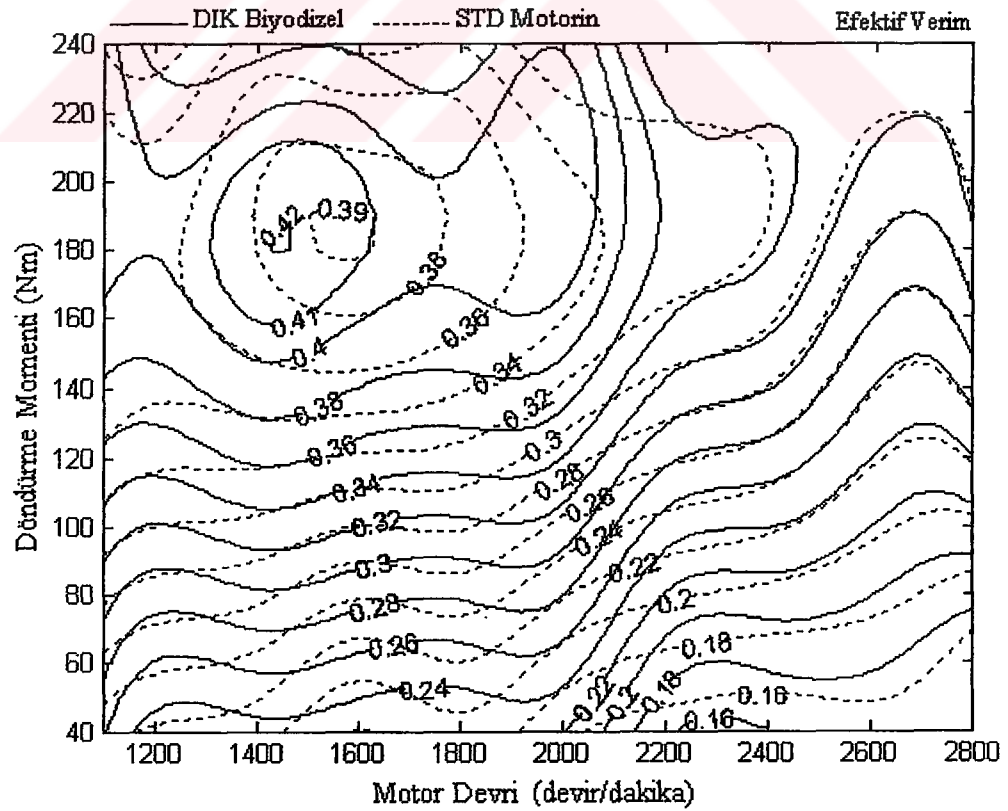
STD biyodizelin eş efektif verim eğrilerinin STD motorin ile karşılaştırılması Şekil 5.19'da görülmektedir. Her iki durum için de en yüksek efektif verim 2. bölgede gerçekleşmiştir. STD biyodizel için efektif verimde özellikle 1. ve 2. bölgedeki bazı noktalarda azalma görülmesine rağmen genel olarak bir artış olmuştur. STD motorin için bu bölgedeki en yüksek değer % 39 olurken, STD biyodizel için % 40 olmuştur. Efektif verim 1. bölgede 1100 devir/dakika ve 40 Nm'de yaklaşık % 12 azalırken, 1400 devir/dakika ve 40 Nm'de ise yaklaşık % 7 artmıştır. 2. bölgede 1600 devir/dakika ve 240 Nm'de yaklaşık % 6 kötüleşme olurken, 1100 devir/dakika ve 240 Nm'de yaklaşık % 15 iyileşme olmuştur. 3. ve 4. bölgelerde ise yaklaşık % 2,5'lik bir iyileşme olduğu gözlenmiştir.

DIK biyodizelin eş efektif verim eğrilerinin STD motorin ile karşılaştırılması Şekil 5.20'de görülmektedir. DIK biyodizel durumunda STD motorine göre tüm çalışma aralığında efektif verimde genel olarak bir atış grlmştir. DIK biyodizel için en yüksek efektif verim 2. bölgede % 42 olmuştur. Efektif verim 1. bölgede 1200 devir/dakika ve 40 Nm'de yaklaşık % 6,5 artarken, 2000 devir/dakika ve 40 Nm'de artış yaklaşık % 30'lara ulaşmıştır. 2. bölgede 1600 devir/dakika ve 160 Nm'de yaklaşık % 5,5 iyileşme olurken, 2000 devir/dakika ve 240 Nm'de yaklaşık % 34 iyileşmiştir. 3. ve 4. bölgelerde ise yaklaşık % 8'lik iyileşme gözlenmiştir.

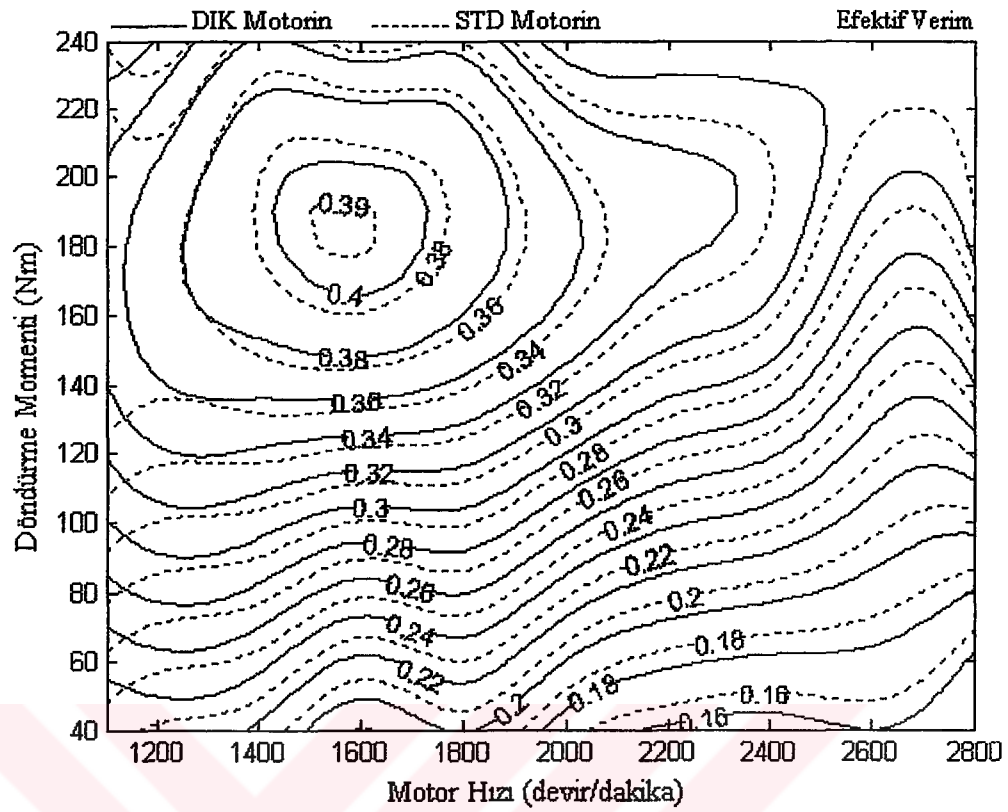
DIK motorin ile STD motorinin eş efektif verim eğrilerinin karşılaştırılması Şekil 5.21'de verilmiştir. DIK motorin için genel olarak efektif verimde STD Motorine göre iyileşme olmuştur. DIK motorin için en yüksek efektif verim 2. bölgede % 40 olarak gerçekleşmiştir. Efektif verimde 1. ve 2. bölgedeki birkaç nokta haricinde tüm çalışma bölgesinde yaklaşık % 4 lk bir iyileşme gözlenmiştir.



Şekil 5.19. STD biyodizel eş efektif verim eğrilerinin STD motorin ile karşılaştırılması.



Şekil 5.20. DIK biyodizel eş efektif verim eğrilerinin STD motorin ile karşılaştırılması.



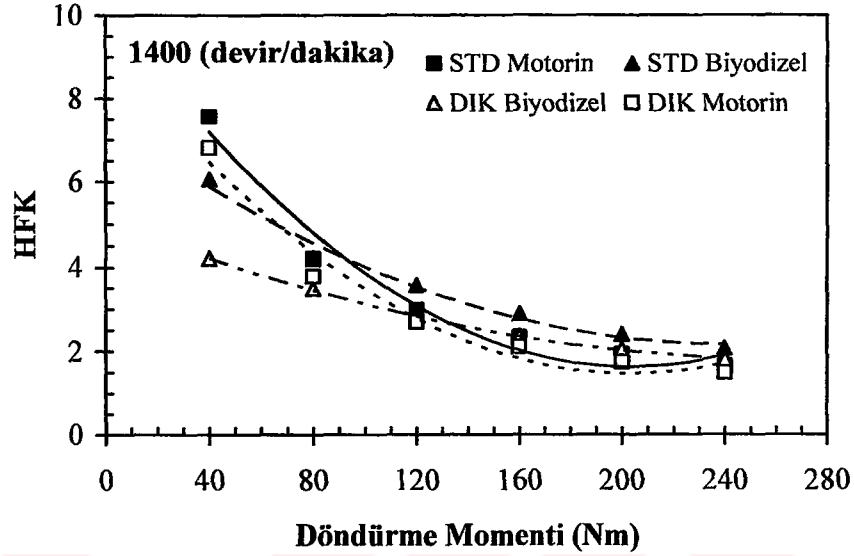
Şekil 5.21. DİK motorin eş efektif verim eğrilerinin STD motorin ile karşılaştırılması.

Biyodizel kullanıldığında efektif verimin artmasının sebebi yakıtların alt ısıl değerlerinden kaynaklanmaktadır. Biyodizelin alt ısıl değeri 36.660 kJ/kg iken motorin için bu değer 42.550 kJ/kg'dır. Yakıtların alt ısıl değerleri arasında bu derece fark olmasına rağmen, sabit devir değişik yük testleri sırasında her iki yakıtında aynı devir ve yük şartlarında kullanılması sonucunda, yakıt olarak biyodizel kullanıldığında efektif verimde iyileşmeye yol açmıştır. DİK motorin durumundaki iyileşme ise özgül yakıt tüketiminin bu şartlarda azalmasından kaynaklanmıştır.

5.2.4. Hava fazlalık katsayısı

1400 devir/dakika'da her bir durum için HFK'nın döndürme momentine göre değişimleri Şekil 5.22'de görülmektedir. Genel olarak HFK döndürme momentinin artmasıyla birlikte azalmaktadır. STD biyodizel için HFK, STD motorine göre 40-80 Nm aralığında ortalama % 9,5 azalırken, 120-240 Nm aralığında ortalama % 23 artmıştır. DİK biyodizel için ise STD motorine göre 40-120 Nm aralığında ortalama % 22 azalırken, 160-240 Nm aralığında ortalama % 6 artmıştır. DİK motorin için ise

HFK, STD motorine göre tüm döndürme momenti aralığında ortalama % 10 azalmıştır.

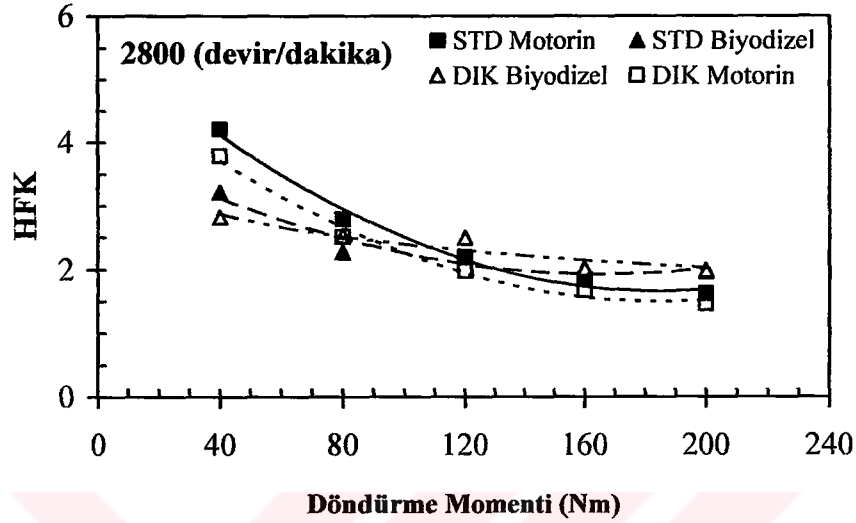


Şekil 5.22. Döndürme momentine bağlı olarak HFK değişimleri (1400 devir/dakika).

2800 devir/dakika'da her bir durum için HFK'nın döndürme momentine göre değişimleri Şekil 5.23'de görülmektedir. STD biyodizel için HFK, STD motorine göre 40-120 Nm aralığında ortalama % 14 azalırken, 160-200 Nm aralığında ortalama % 15 artmıştır. DIK biyodizel için HFK, STD motorine göre 40-80 Nm aralığında ortalama % 21 azalırken, 120-200 Nm aralığında ortalama % 15,4 artmıştır. DIK motorin için ise HFK, STD motorine göre tüm döndürme momenti aralığında ortalama % 9,8 azalmıştır.

Yakıt olarak biyodizel kullanıldığında HFK'nın düşük yüklerde STD motorine göre daha az, yüksek yüklerde ise daha fazla olması şu şekilde açıklanabilir: Dizel motorlarında yük kontrolü silindirlere püskürtülen yakıt miktarının artırılıp azaltılmasıyla yapılır. Aynı devir ve yük için, biyodizelin ısı değeri düşük olması nedeniyle motorine eş değer performans gösterebilmesi için silindirlere daha fazla yakıt gönderilmesinin gerektiği, buna bağlı olarak da HFK'nın azalacağı önceden belirtilmişti. Düşük yüklerde alt ısı değeri düşük olmasından dolayı HFK azalmakta, fakat yüksek yüklerde ise yakıtın viskozitesinin fazla olmasından dolayı pompaya dolma sorunu yaşandığından, silindirlere gönderilen biyodizel miktarı

azalmakta ve sonuç olarak HFK artmaktadır. DIK motorda enjektörden depoya dönen ısınmış yakıt, depodaki yakıtı ısıtıp, viskozitesini düşüreceğinden silindirlere gönderilen yakıt miktarının artması sonucunda, HFK'da azalacaktır.



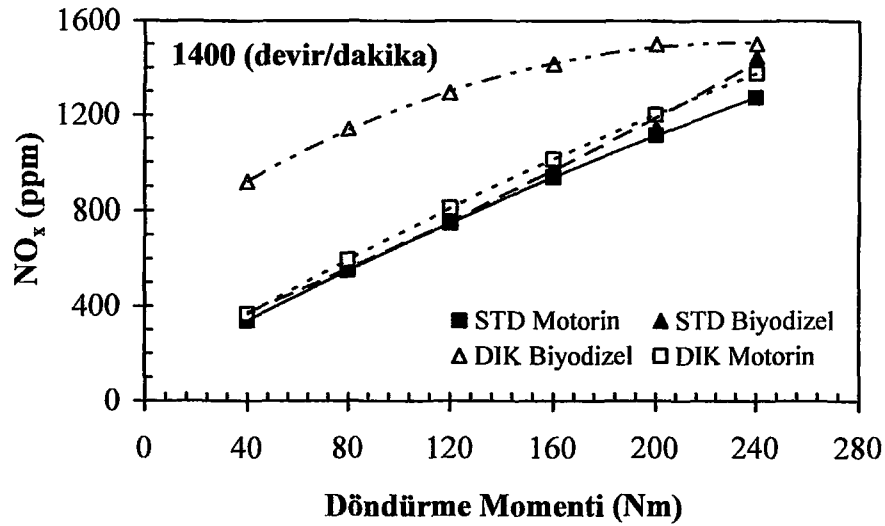
Şekil 5.23. Döndürme momentine bağlı olarak HFK değişimleri (2800 devir/dakika).

5.2.5. Azot oksit emisyonu

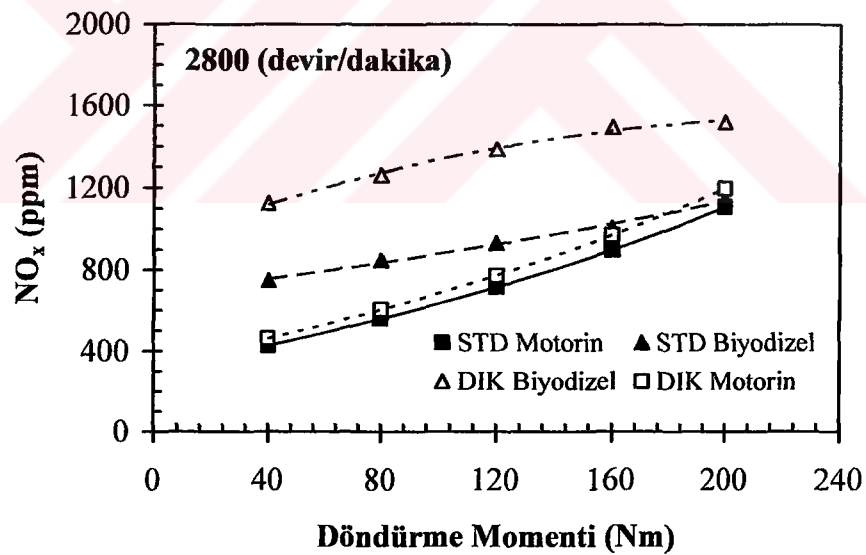
1400 devir/dakika'da her bir durum için NO_x emisyonunun döndürme momentine göre değişimleri Şekil 5.24'de görülmektedir. Genel olarak NO_x emisyonu döndürme momentinin artmasıyla birlikte artmaktadır. STD biyodizel için NO_x emisyonu, STD motorine göre tüm döndürme momenti aralığında ortalama % 5,6 artmıştır. DIK biyodizel için NO_x emisyonu, 40-120 Nm aralığında ortalama % 117 artarken, 160-240 Nm aralığında ortalama % 34,5 artmıştır. DIK motorin için ise STD motorine göre tüm döndürme momenti aralığında NO_x emisyonu ortalama % 8 artmıştır.

2800 devir/dakika'da her bir durum için NO_x emisyonunun döndürme momentine göre değişimleri Şekil 5.25'de görülmektedir. STD biyodizel için NO_x emisyonu, STD motorine göre 40-120 Nm aralığında ortalama % 52,5 artarken, 160-200 Nm aralığında % 7,6 artmıştır. DIK biyodizel için NO_x emisyonu, STD motorine göre 40-120 Nm aralığında ortalama % 127 artarken, 160-200 Nm aralığında ortalama % 52

artmıştır. DIK motorin için ise STD motorine göre, tüm döndürme momenti aralığında NO_x emisyonu ortalama % 8 artmıştır.



Şekil 5.24. Döndürme momentine bağlı olarak NO_x emisyonu değişimleri (1400 devir/dakika).



Şekil 5.25. Döndürme momentine bağlı olarak NO_x emisyonu değişimleri (2800 devir/dakika).

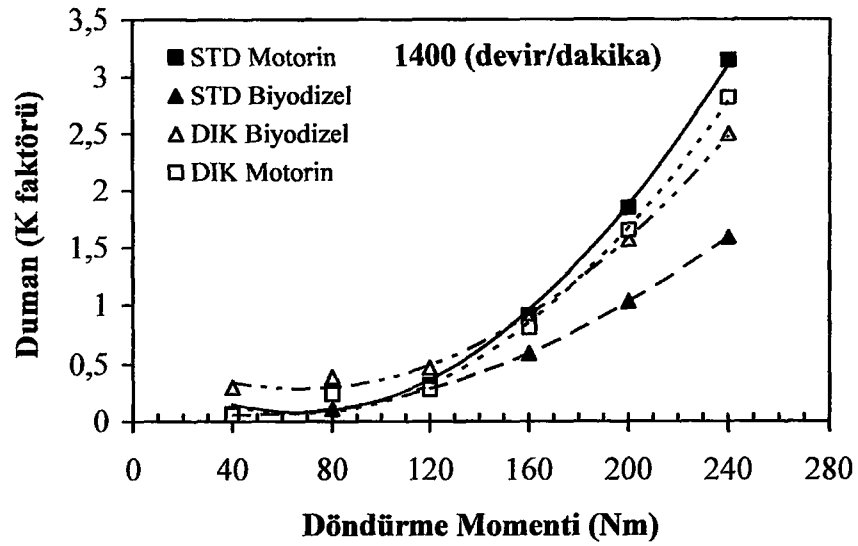
Biyodizel kullanıldığında NO_x emisyonunun motorine göre yüksek çıkmasının nedenlerinden birisi biyodizelin içerisindeki oksijendir. NO_x oluşumunda ortam sıcaklığının yanında, HFK ve yanma odasındaki lokal oksijen konsantrasyonunun da büyük önemi vardır. Yanma işlemi iyileştikçe maksimum yanma sıcaklığı yükseleceğinden, NO_x oluşum hızı artar. Stokiyometrik orana yakın (HFK 1-1,1)

karışımlarda NO_x oluşumu artarken, karışım fakirleşip zenginleştikçe NO_x oluşumu da azalmaktadır. Zengin karışımlarda NO_x oluşumunun azalmasının sebebi, oksijen miktarının azalması, fakir karışımlarda azalmasının sebebi de ısı açığa çıkış hızının azalmasına bağlı olarak maksimum yanma sıcaklığının düşmesidir. Yanma odası içerisindeki lokal oksijen konsantrasyonu arttıkça, yakıt ve oksijen moleküllerinin reaksiyona girme ihtimali artacaktır. Bunun sonucunda da yanma odasındaki lokal ısı açığa çıkış hızı ve sıcaklığı artacağından NO_x oluşumu da artacaktır. Biyodizelin kütleli olarak yaklaşık % 11 oksijen içermesi sebebiyle, yakıtın içerisindeki bu oksijen, yanma sırasında silindir içerisindeki lokal oksijen konsantrasyonunu, dolayısıyla da NO_x emisyonunu artıracaktır [116,117]. DIK motordaki NO_x emisyonunun STD motora göre yüksek çıkmasının sebebi ise, yalıtım neticesinde artan silindir içi gaz sıcaklıklarının alev civarında bölgesel yüksek sıcaklık noktaları oluşturmasıdır.

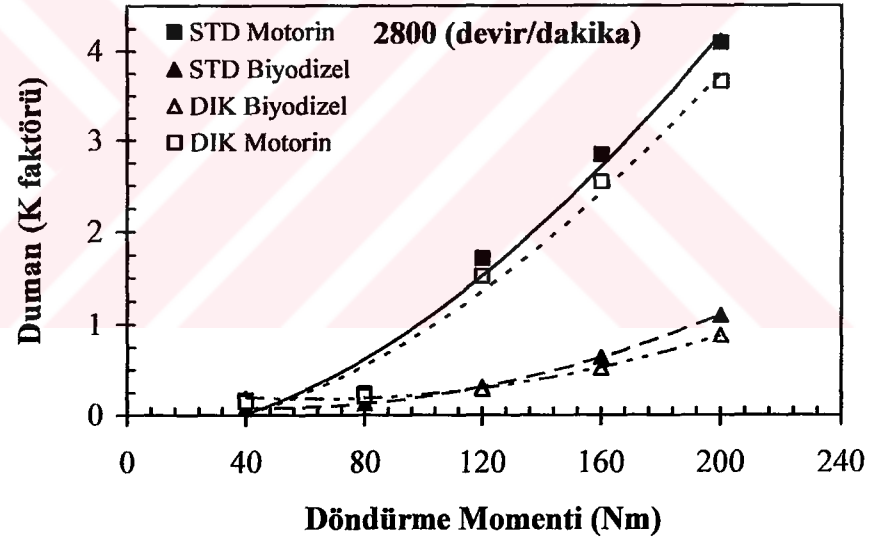
5.2.6. Duman koyuluğu

1400 devir/dakika'da her bir durum için duman koyuluğunun döndürme momentine göre değişimleri Şekil 5.26'da görülmektedir. Genel olarak duman koyuluğu döndürme momentinin artmasıyla birlikte artmaktadır. STD biyodizel için duman koyuluğu, STD motorine göre 40-120 Nm aralığında ortalama % 27,6 azalırken, 160-240 Nm aralığında ortalama % 43 azalmıştır. DIK biyodizel için duman koyuluğu, STD motorine göre 40-120 Nm aralığında ortalama % 140 artarken, 160-240 Nm aralığında ortalama % 12,6 azalmıştır. DIK motorin için ise STD motorine göre tüm döndürme momenti aralığında duman koyuluğu ortalama % 11,7 azalmıştır.

2800 devir/dakika'da her bir durum için duman koyuluğunun döndürme momentine göre değişimleri Şekil 5.27'de görülmektedir. STD biyodizel için duman koyuluğu, STD motorine göre 40-80 Nm aralığında ortalama % 49,4 azalırken, 120-200 Nm aralığında ortalama % 77,5 azalmıştır. DIK biyodizel için duman koyuluğu, STD motorine göre 40 Nm'de % 11,8 artarken, 80-200 Nm aralığında ortalama % 64 azalmıştır. DIK motorin için ise STD motorine göre tüm döndürme momenti aralığında duman koyuluğu ortalama % 11,2 azalmıştır.



Şekil 5.26. Döndürme momentine bağlı olarak duman koyuluğu değişimleri (1400 devir/dakika).



Şekil 5.27. Döndürme momentine bağlı olarak duman koyuluğu değişimleri (2800 devir/dakika).

STD biyodizel durumunda egzozdaki duman koyuluğunun STD motorine göre daha düşük olması tam yük testlerinde belirtildiği gibi biyodizelin içerisindeki oksijenin yakıt zerreciklerinin oksidasyonunu iyileştirmesinden kaynaklanmıştır. DIK biyodizel durumunda duman koyuluğunda gözlenen değişiklik şöyle açıklanabilir; dizel motorlarında sıkıştırılan havanın içerisine püskürtülen yakıtın parçalanarak, yanma odasında dağılması ve buharlaşarak oksijen molekülleriyle reaksiyona girmesi

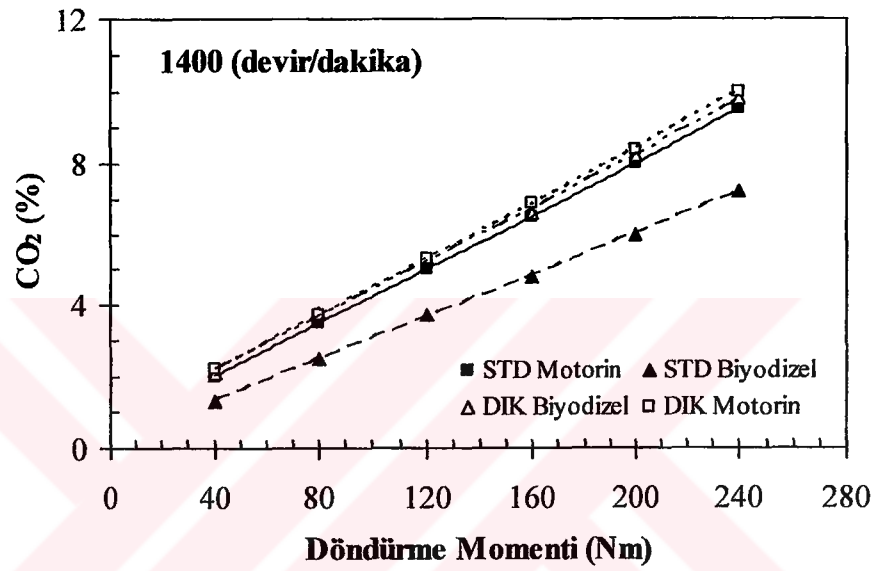
gibi bir takım kimyasal ve fiziksel olaylar meydana gelmektedir [117]. Yakıtın püskürtülmesine bağlı olarak yanma odası içerisindeki hava yakıt oranı sıfır ile sonsuz arasında değişmektedir. Yakıt demetinin merkezinde çok zengin karışım bulunurken buradan uzaklaştıkça karışım fakirleşmektedir. Bu ise yanma odası içerisinde lokal fakir ve zengin karışım bölgelerinin oluşmasına yol açmaktadır. Düşük yüklerde silindirlere daha az yakıt gönderilmesi, yalıtım neticesinde artan silindir içi gaz sıcaklıklarının tutuşma gecikmesi periyodunu kısaltması ve biyodizelin bünyesindeki kütleli olarak yaklaşık % 11'lik oksijenin yanma odası içerisindeki lokal fakir karışım bölgelerini arttırmasına bağlı olarak reaksiyon hızı dolayısıyla ısı açığa çıkış hızı azalacağından yakıt tam olarak yanmadan dışarı atılacaktır. Bu durum ise egzozdaki duman koyuluğunu artırmaktadır. Artan motor yüküyle birlikte silindirlere daha fazla yakıt gönderilmesi reaksiyon hızını, dolayısıyla da ısı açığa çıkış hızını optimum noktaya yaklaştıracak, yanma işlemi iyileştirdiğinden dolayı da egzozdaki duman koyuluğu da azalacaktır. DIK motorin için ise yalıtım neticesinde artan gaz sıcaklıklarının önceden belirtildiği gibi duman oksidasyonunu iyileştirmesine bağlı olarak egzozdaki duman koyuluğu da azalacaktır.

5.2.7. CO₂ emisyonu

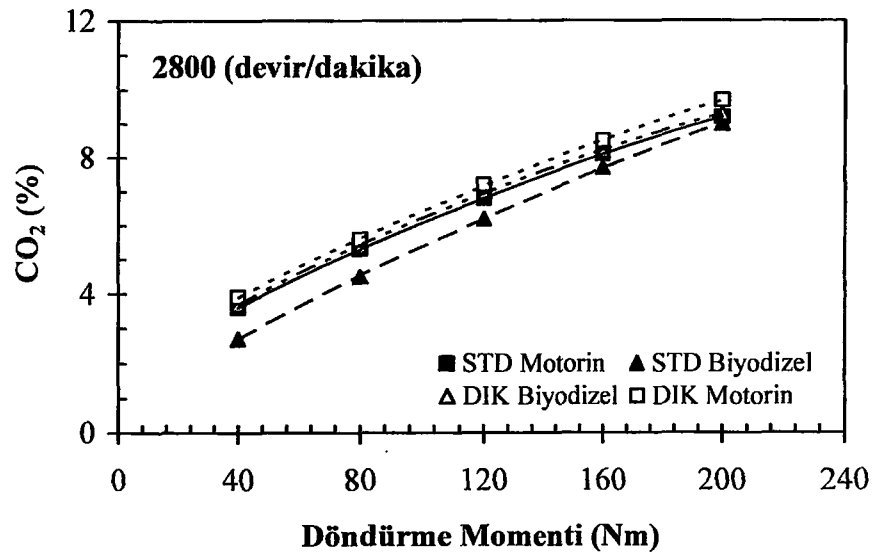
1400 devir/dakika'da her bir durum için CO₂ emisyonunun döndürme momentine göre değişimleri Şekil 5.28'de görülmektedir. Genel olarak CO₂ emisyonu döndürme momentinin artmasıyla birlikte artmaktadır. STD biyodizel için CO₂ emisyonu tüm döndürme momenti aralığında STD motorine göre, ortalama % 27,5 azalmıştır. Altın [27] tek silindirli direkt püskürtmeli bir dizel motorunda 1300 devir/dakika'da maksimum yükte CO₂ emisyonunun motorin için % 12,2 olurken ayçiçeği metil esterini için bu değerin % 11,2'ye düştüğünü belirlemiştir. DIK biyodizel için CO₂ emisyonu, STD motorine göre tüm döndürme momenti aralığında ortalama % 4,4 artmıştır. DIK motorin için ise STD motorine göre tüm döndürme momenti aralığında CO₂ emisyonu ortalama % 5,8 artmıştır.

2800 devir/dakika'da her bir durum için CO₂ emisyonunun döndürme momentine göre değişimleri Şekil 5.29'da görülmektedir. STD biyodizel için CO₂ emisyonu

STD motorine göre, 40-120 Nm aralığında ortalama % 16,3 azalırken, 160-200 Nm aralığında ortalama % 3,5 azalmıştır. Yamık [32] tek silindirli, direkt püskürtmeli bir dizel motorunun ürettiği CO₂ emisyonunun ayçiçek metil esteri kullanıldığında, motorine göre % 20 azaldığını belirtmiştir. DIK biyodizel için CO₂ emisyonu, STD motorine göre, tüm döndürme momenti aralığında ortalama % 2 artmıştır. DIK motorin için ise STD motorine göre CO₂ emisyonu ortalama % 5,85 artmıştır.



Şekil 5.28. Döndürme momentine bağlı olarak CO₂ emisyonu değişimleri (1400 devir/dakika).



Şekil 5.29. Döndürme momentine bağlı olarak CO₂ emisyonu değişimleri (2800 devir/dakika).

BÖLÜM 6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Ham petrol esaslı yakıtların fazla kullanım sonucu azalması ve çevresel faktörler içten yanmalı motorlar konusunda çalışan araştırmacıları, yeni enerji kaynakları bulmaya ve mevcut kaynakları daha verimli bir şekilde kullanmaya yöneltmektedir. DIK motor kavramı bitkisel yağların dizel motorlarına adaptasyonunda, ham petrol esaslı dizel yakıtına alternatif oluşturabileceği için önemlidir.

Bu çalışmada dört zamanlı, su soğutmalı, direkt püskürtmeli, dört silindirli, aşırı doldurmalı bir dizel motorunda STD durumunda yakıt olarak motorin ile biyodizel kullanılarak motor testleri gerçekleştirilmiş, daha sonra motorun silindir kapağı ve supapları plazma sprej yöntemiyle 0,15 mm kalınlığında NiCrAl astar tabaka ve 0,35 mm kalınlığında $Y_2O_3ZrO_2$ ile kaplanarak deney motoru DIK hale getirilmiştir. DIK motorda, STD motor ile aynı şartlarda yakıt olarak motorin ve biyodizel kullanılarak denenmiştir. Bulunan sonuçlar karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

Gerçekleştirilen motor testleri sırasında hem STD, hem de DIK motorda biyodizel kullanıldığında ilk harekete geçişte herhangi bir sorunla karşılaşılmamıştır.

Deneysel çalışmalar tamamlandığında, gerek STD motorda yapılan, gerekse DIK motorda yapılan gözlemler sonucunda piston, silindir kapağı, supaplar ve enjektörlerin iyi durumda olduğu, yakıt filtreleri ve yağlama yağında herhangi bir anormalliğin olmadığı gözlenmiştir.

Yapılan yakıt analizi sonucunda transesterifikasyon yöntemiyle üretilen biyodizelin kinematik viskozitesinin motorine göre yaklaşık 1,8 kat fazla, alt ısıl değerinin yaklaşık % 14 daha düşük, yoğunluğunun % 6 yüksek, alevlenme noktasının yaklaşık 2,9 kat fazla ve donma noktasının % 40 fazla olduğu, setan indeksinin ise aynı kaldığı belirlenmiştir. Transesterifikasyon işlemi ile bitkisel yağın yakıt özellikleri

iyileşerek motorininkine yaklaşmaktadır. Biyodizel için benzer sonuçlar birçok araştırmacı tarafından da vurgulanmıştır [21,24,31,53,58,118,119,120].

Kinematik viskozitenin ve yoğunluğun yüksek olmasına bağlı olarak STD motorda biyodizel kullanıldığında tam yükte özellikle yüksek devirlerde karışımın zenginleşmesi ve yanabilir karışımın hazırlanma güçlüğü; yüksek devirlerde karışım hazırlama süresinin de azalmasıyla efektif güç ve döndürme momentinde azalma meydana gelmiştir. STD motorda biyodizel kullanıldığı durumda düşük devirlerde, DIK motorda biyodizel kullanıldığı durumda ise orta devirlerde STD motorda motorin kullanıldığı duruma göre efektif güç ve döndürme momentinde artışlar gözlenmiştir. Tam yük durumundaki tüm çalışma aralığı boyunca en yüksek efektif güç ve döndürme momenti ise DIK motorda motorin kullanıldığı durumda gerçekleşmiştir. Bunun en önemli sebebi motorinin alt ısı değerinin yüksek olması ve yanma veriminin yüksek sıcaklık etkisiyle iyileşmesidir.

Biyodizelin alt ısı değerinin motorine göre düşük olması bünyesinde kütlece yaklaşık % 11 oksijen içermesinden kaynaklanmaktadır [59,104,111,117,118]. Alt ısı değerindeki bu azalma STD motorda biyodizel kullanıldığında ÖYT'nin motorine göre artmasına yol açmaktadır. DIK motorda yalıtım neticesinde ÖYT'deki artış azda olsa giderilebilse bile, biyodizel kullanıldığında ÖYT, STD motorine göre hem tam yük şartlarında hem de kısmi yük durumunda fazla olmaktadır. Hem tam yük hem de kısmi yük deneyleri sonucunda en düşük ÖYT, DIK motorda motorin kullanıldığı durumda elde edilmiştir.

Biyodizelin alt ısı değerindeki düşüklük egzoz gazı sıcaklığının düşük olmasının nedenlerindedir. STD motorda biyodizel kullanıldığı durum için egzoz gazı sıcaklıkları tam yük ve kısmi yük testlerinde en düşük olmaktadır. DIK motorda biyodizel kullanıldığında yalıtım sonucu egzoz gazı sıcaklığında artış olmaktadır. Bununla birlikte, egzoz gazı sıcaklıkları STD motorda motorin kullanıldığı durumdan yüksek olmamaktadır. DIK motorda motorin kullanıldığı durum için egzoz gazı sıcaklıkları hem tam yük hem de kısmi yük testlerinde en yüksek olarak belirlenmiştir.

STD motorda biyodizel kullanıldığında biyodizelin alt ısı değerinin motorine göre daha düşük olmasına bağlı olarak silindir içindeki yanma sıcaklığı düşmüştür. Bu ise emme hattındaki sıcaklığın STD motorine göre düşmesi dolayısıyla hacimsel verimi artırmıştır. DIK motorda biyodizel kullanıldığında ise yalıtım sonucu artan cidar sıcaklıklarının giriş havası sıcaklığını artırıp, yoğunluğunu düşürmesi ve egzoz gaz sıcaklıklarının da düşük olması sonucu bu durumun turbokompresör tarafından dengelenememesine bağlı olarak hacimsel verim azalmıştır. DIK motorda motorin kullanıldığında yalıtım sonucu artan egzoz gaz sıcaklığı, egzoz gazının kullanılabilir enerjisini artırmaktadır. Bu durum turbokompresör çıkış basıncını yükselterek silindirlere gönderilen hava miktarını dolayısıyla da hacimsel verimi arttırmaktadır.

Motorinin teorik tam yanması için gereken hava/yakıt kütle oranı yaklaşık 14,9/1 iken biyodizel için bu oran yaklaşık 12,4/1'dir. Bu durum ise aynı hava miktarı için silindirlere daha fazla biyodizel gönderilmesi anlamına gelmektedir. Dolayısıyla biyodizel kullanıldığında karışımın ısı değeri motorin kullanıldığı durumlara göre artmıştır.

Yakıtların alt ısı değerleri arasında yaklaşık %14'lük bir fark olmasına rağmen STD motorda biyodizel kullanıldığında tam yükte, efektif güç ve döndürme momentinin en fazla % 4,5 kötüleşmesi ve kısmi yük testlerinde ise her iki yakıtın da aynı devir ve yük kademesinde test edilmesine bağlı olarak biyodizel kullanıldığında efektif verim artmıştır. DIK motorda ise özgül yakıt tüketimlerinin azalması sonucunda efektif verimler her iki yakıtın STD motorda kullanıldığı duruma göre artmıştır.

STD motorda biyodizel kullanıldığında, alt ısı değerinin motorine göre düşük olması sonucunda HFK tam yükte düşük ve orta devirlerde, kısmi yüklerde ise özellikle düşük yüklerde STD motorda motorin kullanıldığı duruma göre azalmıştır. Tam yükte, yüksek devirlerde ve kısmi yüklerde ise yüksek yüklerde, HFK artmıştır. DIK motorda yalıtım sonucu artan sıcaklıklar, yakıt enjeksiyon sistemindeki yakıtı ısıtmakta, enjektörlerden depoya gelen fazla yakıt ise buradaki yakıtın sıcaklığını yükseltip viskozitesini düşürmektedir. DIK motorda biyodizel kullanıldığında HFK tam yükte yüksek devirlerde ve kısmi yüklerde ise yüksek yüklerde, STD motorda motorin kullanıldığı durumdakinden daha yüksek olmuştur. DIK motorda motorin

kullanıldığında ise HFK, STD motorda motorin kullanıldığı duruma göre hem tam yükte, hem de kısmi yüklerde azalmıştır.

STD motorda yakıt olarak biyodizel kullanıldığında, HFK'nın azalması ve biyodizelin oksijen içeriği dolayısıyla NO_x emisyonu, STD motorda motorin kullanıldığı duruma göre artış göstermiştir. DIK motorda ise yukarıda belirtilen nedenlere, yalıtım sonucu yükselen sıcaklıkların alev civarında bölgesel yüksek sıcaklık noktaları oluşturması da eklenince NO_x emisyonu oluşum hızı daha da artmıştır.

STD motorda biyodizel kullanılması durumunda, biyodizelin oksijen içeriği sayesinde tam yükte ve kısmi yüklerde yakıtın oksidasyonunun iyileşmesine bağlı olarak duman emisyonu azalmaktadır. DIK motorda biyodizel kullanılması durumunda, duman emisyonu STD motorda motorin kullanıldığı duruma göre azalmış ise de artan silindir içi gaz sıcaklıklarının tutuşma gecikmesi periyodunu kısaltması sonucu, tam yükte düşük ve orta devirlerde duman emisyonunda STD motorda biyodizel kullanıldığı duruma göre daha az iyileşme olmaktadır. Kısmi yüklerde; yüksek yük ve hızlarda duman koyuluğu STD biyodizelinkinden de düşük olmaktadır. DIK motorda motorin kullanıldığı durumda ise yalıtım sonucu artan gaz sıcaklıklarının duman oksidasyonunu iyileştirmesine bağlı olarak duman azalmıştır.

STD motorda yakıt olarak biyodizel kullanıldığında duman emisyonundaki azalmaya bağlı olarak CO₂ emisyonu tam ve kısmi yüklerde azalmıştır. DIK motorda ise efektif verimin yükselmesi sonucu her iki yakıt için tam ve kısmi yüklerde CO₂ emisyonu artmıştır.

Yakıt olarak biyodizel kullanıldığında genel olarak;

- ÖYT, karışımın ısı değeri, efektif verim ve NO_x emisyonu artmış,
- Egzoz gaz sıcaklığı, HFK, duman koyuluğu ve CO₂ azalmıştır.

DIK motorda genel olarak;

- Egzoz gaz sıcaklığı, karışımın ısıl değeri, efektif verim, NO_x ve CO₂ emisyonları artmış,
- ÖYT, HFK ve duman koyuluğu azalmıştır.

Biyodizelin alevlenme noktasının, motorine göre yüksek olması taşıma ve depolama yönünden daha emniyetli olduğunun göstergesidir. Ayrıca ön ısıtma ile yakıtın viskozitesinin düşürülmesi istendiği durumlarda biyodizelin alevlenme riski motorine göre daha azdır.

STD ve DIK motorda biyodizel kullanıldığı durumlar için deneyler sırasında emisyon cihazından herhangi bir SO_x (kükürt oksit) değeri gözlenmemiştir.

Her iki yakıt ile DIK motorda yapılan testlerde enjektör geri dönüş borusundan gelen yakıtın depodaki yakıt sıcaklığını yükselttiği gözlenmiştir.

Deneyler sırasında elde edilen deneyimlerin ışığı altında olası sorunların giderilmesi ya da sonraki çalışmalara yol göstermesi açısından aşağıdaki öneriler yapılabilir:

Biyodizelin donma noktasının motorine göre yüksek olması onun kış şartlarında kullanımı ve depolanması sırasında sorun oluşturabilir. Fakat kış şartlarında kullanım sırasında karşılaşılan sorunlar alevlenme noktasının yüksekliği dolayısıyla yakıtta ön ısıtma uygulanarak giderilebilir.

Viskozitenin düşürülmesi ve kış şartlarındaki soğuk akış özelliklerinin geliştirilebilmesi için çeşitli katkı maddelerinden (viskozite geliştirici, akma noktası düşürücü, anti jel maddeler vb.) yararlanılabilir.

Hammadde fiyatı biyodizel kullanımının yaygınlaşması önündeki önemli bir sorundur. Kullanılmış bitkisel yağlardan biyodizel üretildiği takdirde hem bu yağların çevreye verdiği zarar, hem de yakıt üretim maliyetleri minimize edilmiş olacaktır.

Uzun süreli depolamalarda biyodizelin fiziksel ve kimyasal özelliklerinin (viskozitenin artması, setan sayısının yükselmesi, ısı değerinin düşmesi vb.) değişmemesi için doğrudan güneş ışığı ve hava ile temas etmeyen kaplar veya depolar kullanılmalıdır.

Bitkisel yağ kaynağı olarak, farklı yenilebilir ve yenilemez yağlar kullanılabilir.

Transesterifikasyon reaksiyonunda değişik alkol (etil, izopropil alkol vb.) ve katalizörler (NaOH) kullanılarak bunların yakıt özelliklerine olan etkisi incelenebilir.

Taşıt kaynaklı hava kirliliğinin yoğun olduğu yerlerde biyodizel kullanımı teşvik edilmelidir.

Hem STD hem de DIK motorda püskürtme avansı ve basıncı değiştirilerek testler yapıldığı takdirde, biyodizel için optimum püskürtme avansı ve basınç değerleri belirlenebilir. Enjektör delik çapı ve delik sayısının etkileri incelenebilir.

DIK motorda yapılan deneylerde kullanılan yakıtlara benzin ve alkol gibi oktan sayısı yüksek olan tutuşma gecikmesini artıran katkı maddeleri ilave edilerek bunların oluşturacağı etki incelenebileceği gibi setan sayısı düşük olan daha az kaliteli yakıtlar (esterleştirilmemiş bitkisel yağlar, gazyağı, jet yakıtı vb.) da denenebilir.

KAYNAKLAR

- [1] İÇİNGÜR, Y. ve YAMIK, H., “Metil ve Etil Esterin Dizel Yakıtı Olarak Kullanılma İmkanlarının Araştırılması”, Politeknik Dergisi, cilt 6, sayı 2, s. 459-464, 2003.
- [2] MONYEM, A., “The Effect of Biodiesel Oxidation on Engine Performance and Emissions”, PhD. Thesis, Iowa State University, USA, 1998.
- [3] ABU-QUDAIS, M. and AL-WIDYAN, M., “Performance and Emissions Characteristics of a Diesel Engine Operating on Shale-Oil”, Energy Conversion and Management, Vol. 43, pp. 673-682, 2002.
- [4] EDGAR, B., “Dimethyl Ether and Other Oxygenated Fuels for Low Emission Diesel Engine Combustion”, PhD. Thesis, University of California, 1997.
- [5] WATANABE, S., KINOSHITA, K., OHASHI, A., UCHIDA, Y., DYKES, D. and TOUCHARD, G., “An Experiment to Purify Diesel Exhaust Gas Using an Electric Trap and Three Types of Catalysers”, J. Electrostatics, pp. 40-41, 1997.
- [6] BİLGİNPEK, H., “Dizel Motorları”, MEB Basımevi, İstanbul, 1991.
- [7] BALCI, M., “Motorlu Taşıtlarda Kirletici Denetimi”, 4. Yanma Sempozyumu, Bursa, s. 437-447, 1995.
- [8] İÇİNGÜR, Y., HAŞİMOĞLU, C. and SALMAN, S., “Effect of Comprex Supercharging on Diesel Emissions”, Energy Conversion and Management, Vol. 44, pp. 1745-1753, 2003.
- [9] WATANABE, S., KINOSHITA, K., HAYASHI, N., OHASHI, A., UCHIDA, Y., DYKES, D. and TOUCHARD, G., “An Experiment to Purify Diesel Exhaust Gas Using an Electric Trap and Three Types of Catalysers” Journal of Electrostatics, Vol. 40&41, pp. 723-728, 1997.
- [10] KUTLAR, O., ERGENEMAN, M., ARSLAN, H. ve MUTLU, M., “Taşıt Egzozundan Kaynaklanan Kirleticiler”, Birsen Yayınevi, İstanbul, 1998.
- [11] McKORMIK, R., ROSS, J. and GRABOSKI, M., “Effect of Several Oxygenates on Regulated Emissions from Heavy Duty Diesel Engines”, Environmental Science and Technology, Vol. 31, No. 4, pp. 1140-1150, 1997.

- [12] CHANG, Y., Van GERPEN, J., LEE, J., JOHNSON, L., HAMMOND, E. and MARLEY, S., "Fuel Properties and Emissions of Soybean Oil Esters as Diesel Fuel", *JAOCS*, Vol. 73, No. 11, pp. 1549-1555, 1996.
- [13] CLARK S., WAGNER, L., SCHROCK, M. and PIENNAAR, P., "Methyl and Ethyl Soybean Esters as Renewable Fuels for Diesel Engines", *JAOCS*, Vol. 61, No. 10, pp. 1632-1638, 1984.
- [14] LAST, J., KRUGER, M. and DURNHOLZ, M., "Emissions and Performance Characteristics of a 4 Stroke DI Diesel Engine Fueled with Blends of Biodiesel and Low Sulfur Diesel Fuel", *SAE Paper No 950054*, 1995.
- [15] SCHUMACHER, L., BORGELT, S., HIRES, W., SPURLING, C., HUMPHREY, J. and FINK, J., "Fueling Diesel Engines with Esterified Soybean Oil", *ASAE Paper MC pp.93-101*, 1993.
- [16] Anonim, "Biodiesel General Information", *Alternative Fuels Data Center*, <http://www.afdc.nrel.gov/altfuel/bio-general.html>, 1999.
- [17] McDONNELL, K., WARD, S. and TIMONEY, D., "Hot Water Degummed Rapeseed Oil as a Fuel for Diesel Engines", *J.Agric. Engng Res.*, Vol.60, pp. 7-14, 1995.
- [18] MA, F. and HANNA, M., "Biodiesel Production: a Review", *Biosource Technology*, Vol. 70, pp. 1-15, 1999.
- [19] CZERWINSKI, J., "Performance of HD-DI Diesel Engine with addition of Ethanol and Rapeseed Oil", *SAE Paper No 940545*, 1994.
- [20] Al-WIDYAN, M., TASHTOUSH, G. and Abu-QUDAIS, M., "Utilization of Ethyl Ester of Waste Vegetable Oils as Fuel in Diesel Engines", *Fuel Processing Technology*, Vol. 76, pp. 91-103, 2002.
- [21] DORADO, M., BALLESTEROS, E., ARNAL, J., GOMEZ, J. and LOPEZ, F., "Exhaust Emissions from a Diesel Engine Fueled with Transesterified Waste Olive Oil", *Fuel*, Vol. 82, pp. 1311-1315, 2003.
- [22] ZIEJEWSKI, M. and KAUFMAN, K., "Vegetable Oils as Potential Alternate Fuel in DI Diesel Engines", *SAE Paper No 831357*, 1983.
- [23] HEMMERLEIN, N., KORTE, V. and RICHTER, H., "Performance, Exhaust Emissions and Durability of Modern Diesel Engines Running on Rapeseed Oil", *SAE Paper No 910848*, 1991.
- [24] MONYEM, A. and GERPEN, J., "The Effect of Biodiesel Oxidation on Engine Performance and Emissions", *Biomass and Bioenergy*, Vol. 20, pp. 317-325, 2001.

- [25] KARAOSMANOĞLU, F., “Türkiye İçin Çevre Dostu-Yenilenebilir Bir Yakıt Adayı: Biyomotorin”, *Ekojenerasyon Dünyası-Kojenerasyon Dergisi*, ICC1 2002 Özel Sayısı, s. 50-56, 2002.
- [26] SRIVASTAVA, A. and PRASAD, R., “Triglycerides-based Diesel Fuels”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 4, pp.111-133, 2000.
- [27] ALTIN, R., “Bitkisel Yağların Dizel Motorlarında Yakıt Olarak Kullanılmasının Deneysel Olarak İncelenmesi”, *Doktora Tezi*, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 1998.
- [28] BORAT, O., BALCI, M. ve SÜRMEŒEN, A., “İçten Yanmalı Motorlar Cilt 1”, *DAYM Matbaası*, Ankara, 1992.
- [29] SAFGÖNÜL, B., ERGENEMAN, M., ARSLAN, H., ARSLAN, H. ve SORUŞBAY, C., “İçten Yanmalı Motorlar”, *Birsen Yayınevi*, İstanbul, 1995.
- [30] GOERING, C., “Engine and Tractor Power”, *Breton Publishers*, Boston, Massachusetts, 1992.
- [31] KADAYIFÇILAR, S. ve ACAR, A., “Yakıtlar ve Yanma”, *Ankara Üniversitesi Ziraat Fakültesi Yayın No: 1260, Ders Kitabı: 362*, Ankara, 1992.
- [32] YAMIK, H., “Dizel Motorlarında Alternatif Yakıt Olarak Yağ Esterlerinin Kullanılma İmkanlarının Araştırılması”, *Doktora Tezi*, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2002.
- [33] ÖZ, İ., BORAT, O. ve SÜRMEŒEN, A., “İçten Yanmalı Motorlar”, *Birsen Yayınevi*, İstanbul, 2002.
- [34] CHANG, R., “Chemistry”, 5th ed., *McGraw-Hill Publishing*, USA, 1994.
- [35] ULUSOY, Y. ve ALİBAŞ, K., “Ayciçek Yağı ve Dizel Yakıtı Karışımlarının Motor Yakıtı Olarak Kullanımında Avans Ayarı Değişimlerinin Motor Performans Değerlerine Olan Etkileri”, *Tarımsal Mekanizasyon 19. Ulusal Kongresi*, Erzurum, 399-405, 2000.
- [36] ERDOĞAN, D., “Bitkisel Yağların Dizel Motorlarında Yakıt Olarak Kullanılması”, *Tarımsal Mekanizasyon 13. Ulusal Kongresi*, Konya, 30-37, 1991.
- [37] UYAR, T., “Organik Kimya”, *Güneş Kitabevi*, İstanbul, 1992.
- [38] NAS, S., GÖKALP, H. ve UNSAL, M., “Bitkisel Yağ Teknolojisi”, *Atatürk Üniversitesi Ziraat Fakültesi*, Erzurum, 1992.
- [39] KARAOSMANOĞLU, F., “Alternatif Yakıtlar”, *İ.T.Ü. Kimya Fakültesi Yüksek Lisans Ders Notu*, İstanbul, 1998.

- [40] ALİBAŞ, K. ve ULUSOY, Y., “Bitkisel Yağların Dizel Motorlarında Yakıt Olarak Kullanım Olanakları”, Tarımsal Mekanizasyon 16. Ulusal Kongresi, Bursa, 147-156, 1995.
- [41] OĞUZ, H., “Tarım Kesiminde Yaygın Olarak Kullanılan Dizel Motorlarında Fındık Yağı Biyodizelinin Yakıt Olarak Kullanım İmkanlarının İncelenmesi”, Doktora Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, 2004.
- [42] KARAOSMANOĞLU, F., CİĞİZOĞLU, K., TÜTER, M. and ERTEKİN, S., “Investigation of the Refining Step of Biodiesel Production”, Energy and Fuel, Vol. 10, pp 890 – 895, 1996.
- [43] RAO, P. and GOPALAKRISHNAN, K., “Vegetable Oils And Their Methylesters As Fuels For Diesel Engines”, Indian Journal of Technology, Vol. 29(6), pp 292-297, 1991.
- [44] KRAWCZYK, T., “Biodiesel-Alternative Fuel Makes Inroads but Hurdles Remain”, Inform, vol. 7(8), pp. 800-815, 1996.
- [45] SCHWAB, A., DYKSTRA, G., SELKE, E., SORENSON, S. and PRYDE, E., “Diesel Fuel From Thermal Decomposition of Soybean Oil”, Journal of American Oil Chemistry Society, vol. 65(11), pp 1781-1786, 1988.
- [46] KÖRBİTZ, W., “Biodiesel Production in Europe and North America, an Encouraging Prospect”, Renewable Energy, vol. 16 pp 1078-1083, 1999.
- [47] THUNEKE, K., RMMELE E., WIDMANN, B. and WILHARM, T., “Standardisation of Rapeseed Oil as a Fuel”, 1st World Conference and Exhibition On Biomass For Energy and Industry, Spain, volume 1, pp. 532-535, 2000.
- [48] LEE, I, JOHNSON, L. and HAMMOND, E., “Use of Branched-Chain Esters to Reduce The Crystallization Temperature of Biodiesel”, Journal of American Oil Chemistry Society, vol. 72(10), pp. 1155-1160, 1995.
- [49] Anonim, “Bitkisel Yağlar ve Rafinasyon”, <http://www.helvacizade.com.tr/uretim.htm>, 2004.
- [50] VELLGUTH, G., “Performance of Vegetable Oils and Their Monoesters as Fuels for Diesel Engines”, SAE Paper No 831358, 1983.
- [51] KARAOSMANOĞLU, F. and AKSOY, H., “Kullanılmış Kızartma Atık Yağının Seyreltme Yöntemi ile Alternatif Yakıt Olarak Değerlendirilmesi”, Türkiye 6. Enerji Kongresi, İzmir, 461-470, 1994.
- [52] OĞUZ H., DEMİR F. and ACAROĞLU M., “The Investigation of the Possibilities of Using Sunflower Oil in Diesel Engines as Fuel”, 1st World Conference and Exhibition On Biomass For Energy and Industry”, Spain, vol. 1, pp. 661-663, 2000.

- [53] YÜCESU, H., ALTIN, R.ve ÇETİNKAYA, S., “Dizel Motorlarında Alternatif Yakıt Olarak Bitkisel Yağ Kullanılmasının Deneysel İncelenmesi”, *Turk.J.Engin.Environ.Sci.*,vol. 25, pp.39-49, 2001.
- [54] ANTOLIN, G., TINAUT, F.V., BRICENO, Y., CASTANO, V., PEREZ and RAMIREZ, A., “Optimisation og Biodiesel Production by Sunflower Oil Transesterification”, *Biosource Technology*, vol. 83, pp. 111-114, 2002.
- [55] OĞUZ H., “Tarım Kesiminde Yaygın Olarak Kullanılan Dizel Motorlarında Fındık Yağı Biyodizelinin Yakıt Olarak Kullanım İmkanlarının İncelenmesi,” Doktora Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, 2004.
- [56] ALTIN, R. ve BALCI, M., “Ayçiçek Metil Ester Yakıtının Dizel Motorlarında Yakıt Olarak Kullanılması Üzerine Bir Araştırma”, *Teknoloji Dergisi*, cilt 1, sayı 1, s. 4-15, 1998.
- [57] YAHYA, A., “Performance Characteristics of Direct Injection Diesel Engine Operating on Methyl Soyoil and Methyl Tallow Esters”, PhD. Thesis, Iowa State University, USA, 1988.
- [58] DA SILVA, F., PRATA, A. and TEIXEIRA, J., “Technical Feasibility Assesment of Oleik Sunflower Methyl Ester Utilisation in Diesel Bus Engines”, *Energy Conversion and Management*, vol. 44 (18), pp. 2857-2878, 2003.
- [59] ÇANAKÇI, M. and VAN GERPEN, J., “Comparison of Engine Performance and Emissions for Petroleum Diesel Fuel, Yellow Grease Biodiesel and Soybean Oil Biodiesel”, *SAE Paper No 016050*, 2001.
- [60] BÜNGER, J., KRAHL, J., BAUM, K., SCHRÖDER, O., MÜLLER, M., WESTPHAL, G., RUHNAU, P., SCHULZ, T. and HALLIER, E., “Cytotoxic and Mutagenic Effects, Particle Size and Concentration Analysis of Diesel Engine Emissions Using Biodiesel and Petrol Diesel as Fuel”, *Genotoxicity*, pp. 490-498, 2000.
- [61] MITTELBACH, M.and TRIIHHART, P., “Diesel Fuels Derived From Vegetable Oils III. Emission Tests Using Methyl Esters of Used Frying Oil”, *Journal of American Oil Chemistry Society*, vol. 65(7), pp. 1185-1187, 1988.
- [62] ZHANG, Y., DUBE, M., MCLEAN, D. and KATES, M., “Biodiesel Production from Waste Cooking Oil: 1. Process Design and Technological Assessment”, *Bioresource Technology*, vol. 89, pp. 1-16, 2003.
- [63] LANG, X, DALAI, A., BAKHSHI, N., REANEY, M. and HERTZ, P., “Preparation and Characterization of Bio-Diesels From Various Bio-Oils”, *Bioresource Technolgy*, vol. 80, pp. 53-60, 2001.

- [64] HEJWOWSKI, T. and WERONSKI, A., "The Effect of Thermal Barrier Coatings on Diesel Engine Performance", *Vacuum*, vol. 65, pp. 427-432, 2002.
- [65] PARKER, D. and BONAR, J., "Thermal Barrier Coatings for Diesel Engines: Ten Years of Experience", SAE Paper No 922438, 1992.
- [66] ÇELİK, H., "Bir Dizel Motorunda Seramik Kaplamanın Performansa Etkilerinin İncelenmesi", Doktora Tezi, Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 1991.
- [67] PARLAK, A. ve YAŞAR, H., "Düşük Isı Kayıplı Dizel Motorlarında Yapılan Çalışmaların Performans Açısından Değerlendirilmesi", 6. Uluslar arası Yanma Sempozyumu, İstanbul, 1999.
- [68] AMANN, C., "Promises and Challenges of the Low Heat Rejection Diesel", *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, vol. 110, pp. 475-482, 1988.
- [69] Anonim, "Internal Combustion Engines", Department of Aerospace and Mechanical Engineering, University of Notre Dame, <http://www.nd.edu/~msen/Teaching/DirStudies/Engines.pdf>, 2004.
- [70] KAMO, R., ASSANIS, D. and BRYZIK, W., "Thin Thermal Barrier Coatings for Engines", SAE Paper No 890143, 1989.
- [71] GATOWSKI, J., "Evaluation of a Selectively-Cooled Single-Cylinder 0,5L Diesel Engine", SAE Paper No 900693, 1990.
- [72] ÇEVİK, İ., "Zirkonya Esaslı Seramik Kaplamanın Fiziksel ve Kimyasal Özelliklerinin Değiştirilmesi", Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 1992.
- [73] GEÇKİNLİ, A., "İleri Teknoloji Malzemeleri", Teknik Üniversite Matbaası, İstanbul, 1992.
- [74] YAŞAR, H., "Termal Bariyer Kaplamanın Turbo Doldurmalı Bir Dizel Motorunun Performansına Etkileri", Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 1997.
- [75] Anonim, "Kaplama Metotları", Senkron Metal A.Ş., <http://www.senkronmetal.com.tr>, 2004.
- [76] NEWTON, K., STEEDS, W. and GARRETT, T., "The Motor Vehicle", Butterworth Heinemann Pres, England, 1996.
- [77] HEYWOOD, J., "Internal Combustion Engine Fundamentals", McGraw-Hill Publishing, New York, 1988.

- [78] KAWAMURA, H., SEKIYAMA, S. and HIRAI, K., "Observation of the Combustion Process in a Heat Insulated Engine", SAE Paper No 910462, 1991.
- [79] SUN, X., WANG, W. and BATA, R., "Performance Evaluation of Low Heat Rejection Engines", Transactions of ASME, vol. 116, pp 758-764, 1994.
- [80] PRASAD, C., KRISHNA, M., REDDY, C. and MOHAN, K., "Performance Evaluation of Non-Edible Vegetable Oils As Substitute Fuels in LHR Diesel Engines", Proc. Instn. Mech.Engrs., vol 214, pp. 181-187, 2000.
- [81] YAŞAR, H., BÜYÜKKAYA, E. ve ÇELİK, V., "Application of Thermal Barrier Coating in a Turbocharged DI Diesel Engine", 5. Yanma Sempozyumu, Bursa, s. 460-468, 1996.
- [82] KVERNES, I., NORHOLM, O. ve SVARTDAL, J., "Ceramic Coatings Influences on Medium Speed Diesel Engine Performance and Reliability", Marine Management, p.10, 1990.
- [83] UZUN, A., ÇEVİK, İ. and AKÇİL, M., "Effects of Thermal Barrier Coating on a Turbocharged Diesel Engine Performance", Surface and Coatings Technology, vol.116-119, 505-507, 1999.
- [84] SCHWARZ, E., REID, M., BRYZIK, W. and DANIELSON, E., "Combustion and Performance Charactersitics of a Low Heat Rejection Engine", SAE Paper No 930988, 1993.
- [85] PARLAK, A., YAŞAR, H. and ŞAHİN, B., "Performance and Exhaust Emission Characteristic of a Lower Compression Ratio LHR Diesel Engine", Energy Conversion and Management, vol. 44,issue 1, pp.163-175, 2003.
- [86] WOODS, M., BRYZIK, W. and SCHWARZ, E., "Heat Rejection from High Output Adiabatic Diesel Engine", SAE Paper No 920541, 1992.
- [87] ALKIDAS, A., "Performance and Emissions Achievements with an Uncooled Heavy-Duty, Single-Cylinder Diesel Engine", SAE Paper No 890144, 1989.
- [88] KAWAMURA, H., HIGASHINO, A. and SEKIYAMA, S., "Combustion and Combustion Chamber for a Low Heat Rejection Engine", SAE Paper No 960506, 1996.
- [89] WANG, Y., YANG, C., SHU, G., JU, Y. and ZHAO, K., "An Observation of High Temperature Combustion Phenomenon in Low Heat Rejection Diesel Engines", SAE Paper No 940949, 1994.
- [90] ALKIDAS, A., "On the Performance and Emissions of an Uncooled Heavy-Duty Single-Cylinder Diesel Engine", SAE Paper No 880013, 1988.

- [91] YAŞAR, H., PARLAK, A. ve KOLİP, A., “Standart ve Düşük Isı Kayıplı bir Dizel Motorun Tersinmezlik Kaynaklarının Karşılaştırmalı Analizi”, 8. Uluslar arası Yanma Sempozyumu, s. 36-47, Ankara, 2004,
- [92] PARLAK, A., “The Effects of Partial Suppression of Heat Loss to Coolant on Performance and Exhaust Emission Characteristics of an IDI Supercharged Diesel Engine”, Gazi Üniversitesi FBE Dergisi, cilt 15, no 4, s. 867-878, 2002.
- [93] ASSANIS, D. and HEYWOOD, J., “Development and Use of a Computer Simulation of the Turbocompound Diesel System for Engine Performance and Component Heat Transfer Studies”, SAE Paper No 860329, 1986.
- [94] PARLAK, A. ve YAŞAR, H., “Yanma Sıcaklığı-Sıkıştırma Oranı İlişkisinin Motor Performansına Etkisi Üzerine Teorik Dizel Çevrim Analizi”, Gazi Üniversitesi FBE Dergisi, cilt14, no 4, s. 1251-1260, 2001.
- [95] PARLAK, A., YAŞAR, H. and ELDOĞAN, O., “The Effect of Thermal Barrier Coating on a Turbo-charged Diesel Engine Performance and Exergy Potential of the Exhaust Gas”, Energy Conversion and Management, vol. 46, pp. 489-499, 2005.
- [96] KIMURA, S., MATSUI, Y. and ITOH, T., “Effects of Combustion Chamber Insulation on the Heat Rejection and Thermal Efficiency of Diesel Engines”, SAE Paper No 920543, 1992.
- [97] PARLAK, A., “The Effect of Heat Transfer on Performance of the Diesel Cycle and Exergy of the Exhaust Gas Stream in a LHR Diesel Engine at the Optimum Injection Timing”, Energy Conversion and Management, vol. 46, p.167-179, 2005.
- [98] Anonymous, “Standard Test Methods for Calculated Cetane Index of Distillate Fuels”, ASTM Standard, D 976-91, 2001.
- [99] ŞAHİN, F., SAVAŞ, Y., SALMAN, S., “Elektronik Kuvvet Ölçüm Sistemi ve Hidrolik Motor Test Dinamometresine Uygulanması”, 8. Uluslararası Yanma Sempozyumu, s. 513-522, ANKARA, 2004.
- [100] İÇİNGÜR, Y., “Dizel Motorlarının Aşırı Doldurulmasında Kullanılan Bir Basınç Dalga Makinasının Tasarımı ve Kullanılabilirliğinin Deneysel Analizi”, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 1996.
- [101] PULKRABEK, W., “Engineering Fundamentals of the Internal Combustion Engine”, Prentice Hall Publishing, New Jersey, 1997.
- [102] USTA, N., ÖZTÜRK, E. ve CAN, Ö., “Yüksek Serbest Yağ Asitlerine Sahip Bitkisel Yağ Kaynaklarından Biyodizel Üretimi ve Dizel Motorlarında

- [102] USTA, N., ÖZTÜRK, E. ve CAN, Ö., “Yüksek Serbest Yağ Asitlerine Sahip Bitkisel Yağ Kaynaklarından Biyodizel Üretimi ve Dizel Motorlarında Kullanımı”, 8. Uluslararası Yanma Sempozyumu, s. 252-262, ANKARA, 2004.
- [103] ÇETİNKAYA, M., ULUSOY, Y., TEKİN, Y. and KARAOSMANOĞLU, F., “Engine and Winter Road Test Performances of Used Cooking Oil Originated Biodiesel”, *Energy Conversion and Management*, vol. 46, pp. 1279-1291, 2005.
- [104] RAMADHAS, A., MURALEEDHARAN, C. and JAYARAJ, S., “Performance and Emission Evaluation of a Diesel Engine Fueled with Methyl Esters of Rubber Seed Oil”, *Renewable Energy*, vol. 30, pp. 1789-1800, 2005.
- [105] PUHAN, S., VEDARAMAN, N., RAM, B., SANKARNARAYANAN, G. and JEYCHANDRAN, K., “Mahua Oil (Madhuca Indica Seed Oil) Methyl Ester as Biodiesel-Preparation and Emission Characteristics”, vol. 28, pp. 87-93, 2005.
- [106] HAZAR, H. ve ÖNER, C., “Termal Bariyer Kaplamanın Motor Performansına Etkisi”, 8. Uluslararası Yanma Sempozyumu, s. 125-132, ANKARA, 2004.
- [107] RAHEMAN, H. and PHADATARE, A., “Diesel Engine Emissions and Performance From Blends of Karanja Methyl Ester and Diesel”, *Biomass and Bioenergy* vol. 27, pp, 393-397, 2004.
- [108] ÇETİNKAYA, M. ve KARAOSMANOĞLU, F., “Biodiesel As a Generator Fuel”, 8. Uluslararası Yanma Sempozyumu, s. 304-314, ANKARA, 2004.
- [109] USTA, N., ÖZTÜRK, E., CAN, Ö., CONKUR, E., NAS, S., ÇON, A., CAN, A. and TOPCU, M., “Combustion of Biodiesel Fuel Produced from Hazelnut Soapstock/Waste Sunflower Oil Mixture in a Diesel Engine”, *Energy Conversion and Management*, vol. 46, pp. 741-755, 2005.
- [110] USTA, N., “An Experimental Study on Performance and Exhaust Emissions of a Diesel Engine Fuelled with Tobacco Seed Oil Methyl Ester”, *Energy Conversion and Management*, vol. 46, pp. 2373-2386, 2005.
- [111] ÇANAKÇI, M., “Combustion Characteristics of a Diesel Engine Fueled with Biodiesel From Soybean Oil”, 8. Uluslararası Yanma Sempozyumu, s. 364-375, ANKARA, 2004.
- [112] USTA, N., “Use of Tobacco Seed Oil Methyl Ester in a Turbocharged Indirekt Injection Diesel Engine”, *Biomass and Bioenergy*, vol. 28, pp.77-86, 2005.

- [113] DESAI, R. and WATSON, H., "Effects of Fuel Composition on DI Diesel Engine Particulates and Study of Oxygen Enriched Diesel NO Formation", SAE Paper No 971143, 1997.
- [114] İÇİNGÜR, Y., ÇELİKTEN, İ., SALMAN, S. ve KOCA, A., "Dizel Motorlarında Servis Koşullarından Kaynaklanan Emisyonların Deneysel Olarak İncelenmesi", 3. Ulusal Yanma ve Hava Kirliliği Sempozyumu, s. 156-167, Ankara, 1995.
- [115] BALCI, M., "Taşıt Performansı", Gazi Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi Yüksek Lisans Ders Notu, Ankara, 2000.
- [116] HAŞİMOĞLU, C., "Dizel Motorlarında Egzoz Gazları Resirkülasyonunun Motor Performansı ve Egzoz Emisyonlarına Etkisinin Deneysel Olarak İncelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, 2000.
- [117] ŞANLI, H. ve ÇANAKÇI, M., "Biyodizel Egzoz Emisyonundaki NO_x Artışının Nedenleri Üzerine Bir Değerlendirme", 8. Uluslararası Yanma Sempozyumu, s. 418-427, ANKARA, 2004.
- [118] ALTIPARMAK, D., KESKİN, A. ve GÜRÜ, M., "Mısır Yağı Metil Esterinin Dizel Motorlarda Alternatif Yakıt Olarak Kullanımının Araştırılması", 8. Uluslararası Yanma Sempozyumu, s. 377-384, ANKARA, 2004.
- [119] ALTIPARMAK, D., KESKİN, A. ve GÜRÜ, M., "Ayçiçek Yağı Metil Esterinin Dizel Motorlarda Alternatif Yakıt Olarak Kullanımı", 8. Uluslararası Yanma Sempozyumu, s. 647-652, ANKARA, 2004.
- [120] ALTIPARMAK, D., KESKİN, A. ve GÜRÜ, M., "Dizel Motorlarda Fındık Yağı Metil Esterinin Alternatif Yakıt Olarak İncelenmesi", 8. Uluslararası Yanma Sempozyumu, s. 641-646, ANKARA, 2004.

EKLER

Ek A Biyodizelin fiziksel ve kimyasal özellikleri



PETROLEUM RESEARCH CENTER
PETROL ARAŞTIRMA MERKEZİ



PETROL ÜRÜNLERİ DENETİM ANALİZLERİ

Talep Eden : Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fak. Oto. Anabilim Dalı
İl : Ankara Bayii/Firma : Y.Doç.Dr. Yakup İCİNGÜR
İlçe : Adresi
Şirket : Belirsiz
PAL'e Geliş Tarihi : 11.02.2004 Rapor Tarihi : 16.04.2004
AGUDOS No : 04-08-09-007 Numune Yeri :
Pal Ref. No : 04-0540 Numune Tarih:
Rafineri/Depo/Ülke: Rafineri Tarih:

BİODİSEL

ANALİZ	YÖNTEM	PAL SONUÇ
Görünüş	Gözle Muayene	Sarı
Yoğunluk, 15 °C'da, (kg/ m ³)	TS 6311	892.2
Kinematik Viskozite, mm ² /s 40°C'da	TS - 1451	5.78
Akma Noktası (°C)	TS-1233	-6
Kükürt (% Ağırlıkça)	TS 6838	0.018
Parlama Noktası (°C)	TS 1273	157.6
Üst Isıl Değer (cal/g)	ASTM 240	9516
Alt Isıl Değer (cal/g)	ASTM 240	8771
Karbon (% Ağırlıkça)	Elementel Analiz	85.28
Hidrojen (% Ağırlıkça)	Elementel Analiz	14.72

Not: Akma Noktası 1.ölçüm:-3 2.ölçüm:-3
Üst Isıl Değer 1.ölçüm:9528 2.ölçüm:9510 3.ölçüm:9510
Alt Isıl Değer 1.ölçüm:8782 2.ölçüm:8765 3.ölçüm:8765
Numune distile edilememiştir.

SONUÇ:

Prof. Dr. Ender OKANDAN

Prof. Dr. Birol DEMİRAL

Prof. Dr. Fevzi GÜMRAH

Ek B Motorinin fiziksel ve kimyasal özellikleri

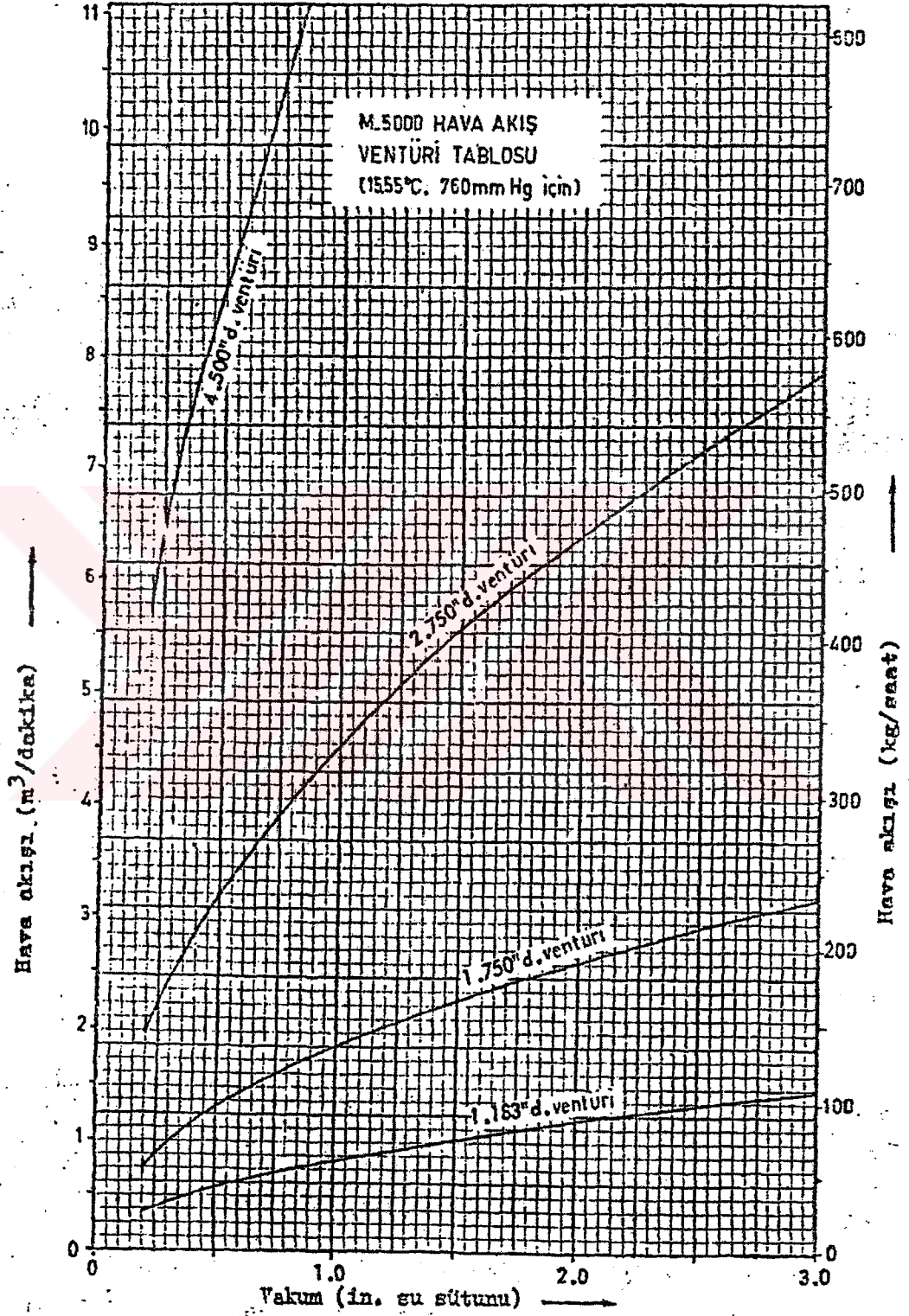
API: 41.0 - 33.0

TOPRAŞ TÜRKİŞH PETROLEUM REFINERİES CORPORATION GENERAL MANAGEMENT		Document No : GM.ÜPm.ÜS-400 Date of Issue : Aug, 1994 Revision Date : Dec, 2002 Revision No : 6 Page No : 1/1			
PRODUCT SPECIFICATION					
Property	Test Unit	Guarantee	Limit	Test Method ASTM	IP
Density at 15 °C	kg/lt	0.820-0.860		D 1298	
Flash Point	°C	55	Min	D 93	
Cold Filter Plugging Point (CFPP)	°C				309
Winter Grade (a)		- 10	Max		
Summer Grade (b)		5	Max		
Distillation	vol %			D 86	
Recovered at 250 °C	vol %	65	Max		
Recovered at 350 °C	vol %	85	Min		
Recovered at 370 °C	vol %	95	Min		
Sulphur	wt %	0.70	Max		336 or 242
Carbon Residue (on 10 % residue)	wt%	0.30	Max	D 524 or D 4530	
Viscosity at 40 °C	cst	2.0-4.5		D 88 or D 445	
Copper Strip Corrosion (3h at 50 °C)		No.1	Max	D 130	
Ash	wt%	0.01	Max	D 482	
Cetane Index	Calculated	46	Min	D 976	
Water	mg/kg	200	Max	D 6304	
Particulate matter	mg/kg	24	Max		415
Oxidation Stability	g/m ³	25	Max	D 2274	

(a) 1 October-31 March (± 15 days)
(b) 1 April-30 September (±15 days)
(*) This product is produced in İzmit, İzmir and Kırıkkale Refineries.

	HAZIRLAYAN	KONTROLÖR 1	KONTROLÖR 2	ONAYLAYAN
İSİM	Nurullah ÖZDEMİR Üretim Planlama Baş Mühendisi	Tulay ÖZTUNA Üretim Planlama Müdürü	Erkan HATİPOĞLU Genel Müdür Yardımcısı	Hüsamettin DANIŞ Genel Müdür
İSİM				
TARİHİ	18.12.2002	18.12.2002	18.12.2002	18.12.2002

Ek C M 5000 Hava Akış Ventüri Tablosu



ÖZGEÇMİŞ

1975 yılında Sakarya’da doğdu. İlk öğrenimini Sakarya’da, orta öğrenimini Eskişehir’de tamamladı. Eskişehir Motor Anadolu Teknik Lisesi Uçak Motorları Bölümünden 1994 yılında mezun oldu. Lisans Eğitimi 1998 yılında Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Makine Eğitimi Bölümü Otomotiv Anabilim dalında tamamladı. 1998-2002 yılları arasında Selçuk Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Makine Eğitimi Bölümü Otomotiv Anabilim dalında Araştırma Görevlisi olarak çalıştı. 2000 yılında Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Eğitimi Anabilim dalında “Dizel Motorlarında Egzoz Gazları Resirkülasyonunun (EGR) Motor Performansı ve Egzoz Emisyonlarına Etkisinin Deneysel Olarak İncelenmesi” konulu tezini vererek yüksek lisans eğitimini tamamladı. 2002 yılında Sakarya Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Makine Eğitimi Bölümü Otomotiv Anabilim dalında Araştırma Görevlisi olarak çalışmaya başladı. Aynı yıl Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Eğitimi Anabilim dalında doktora öğrenimine başladı. Halen Sakarya Üniversitesi’nde Araştırma Görevlisi olarak çalışmalarına devam etmektedir. Evlidir.