

**T.C.
BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**



**DİZEL MOTORUNDA DİZEL YAKITI - ALKOL - BİTKİSEL
YAĞ KARIŞIMLARI KULLANIMININ MOTOR
KARAKTERİSTİKLERİNE ETKİLERİNİN İNCELENMESİ**

DOKTORA TEZİ

Alpaslan ATMANLI

BALIKESİR, HAZİRAN-2013

**T.C.
BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**



**DİZEL MOTORUNDA DİZEL YAKITI - ALKOL - BİTKİSEL
YAĞ KARIŞIMLARI KULLANIMININ MOTOR
KARAKTERİSTİKLERİNE ETKİLERİNİN İNCELENMESİ**

DOKTORA TEZİ

Alpaslan ATMANLI

BALIKESİR, HAZİRAN-2013

KABUL VE ONAY SAYFASI

Alpaslan ATMANLI tarafından hazırlanan “DİZEL MOTORUNDA DİZEL YAKITI-ALKOL-BİTKİSEL YAĞ KARIŞIMLARI KULLANIMININ MOTOR KARAKTERİSTİKLERİNE ETKİLERİNİN İNCELENMESİ” adlı tez çalışmasının savunma sınavı 28.06.2013 tarihinde yapılmış olup aşağıda verilen jüri tarafından oy birliği / ~~oy çokluğu~~ ile Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği Anabilim Dalında Doktora Tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Danışman
Prof. Dr. Bedri YÜKSEL



Üye
Prof. Dr. Hüseyin Serdar YÜCESU



Üye
Prof. Dr. Fikret YÜKSEL



Üye
Doç. Dr. Nadir İLTEN



Üye
Yrd. Doç. Dr. Aslan Deniz KARAOĞLAN



Jüri üyeleri tarafından kabul edilmiş olan bu tez BAÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulunca onanmıştır.

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

Prof. Dr. Hilmi NAMLI

.....

Bu tez çalışması Balıkesir Üniversitesi Rektörlüğüne bağlı Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından 2012/52 nolu proje ile desteklenmiştir.

ÖZET

DİZEL MOTORUNDA DİZEL YAKITI-ALKOL-BİTKİSEL YAĞ KARIŞIMLARI KULLANIMININ MOTOR KARAKTERİSTİKLERİNE ETKİLERİNİN İNCELENMESİ

DOKTORA TEZİ

ALPASLAN ATMANLI

BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ, FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

(TEZ DANIŞMANI: PROF. DR. BEDRİ YÜKSEL)

BALIKESİR, HAZİRAN-2013

Dizel motorlu araçlarda biyoyakıt karışımlarının kullanılması çevresel ve ekonomik açıdan çok önemlidir. Biyokütleden üretilebilen bitkisel yağlar ve biyoalkoller dizel motorlar için alternatif bir biyoyakıt kaynağıdır.

Bu çalışmada, euro dizel yakıtı ile karışım oluşturmak için biyoalkol bileşeni olarak n-bütanol ve bitkisel yağ bileşeni olarak da Türkiye'nin ekili alanları dikkate alındığında yüksek üretim potansiyeli bulunan nötr pamuk yağı kullanılmıştır.

Titrasyon yöntemi ile bileşenlerin farklı sıcaklıklarda (oda sıcaklığı, 5 °C, 0 °C, -5 °C ve -10 °C) birbirleri ile olan çözünürlük ilişkileri incelenmiş ve her sıcaklık değeri için üçlü faz diyagramları çizilmiştir. -10 °C sıcaklığa ait diyagramdaki faz ayrışmasının gerçekleşmediği alan içerisinden deney tasarımı metoduyla 7 farklı konsantrasyon seçilerek deney yakıtları hazırlanmıştır. Deney yakıtları kullanılarak dört silindirli, dört zamanlı, turboşarjlı, direkt püskürtmeli bir dizel motorunda motor karakteristiklerinin belirlenmesi için tam yük değişik devir testi uygulanmıştır. Deney motorunun maksimum moment devri olan 2200 d/dk.'daki deney sonuçları esas alınarak en ideal üçlü karışım içerisindeki bileşen konsantrasyonlarının belirlenmesi için yanıt yüzey metodu kullanılmış ve belirlenen motor performansı ve egzoz emisyon parametrelerine göre optimizasyon yapılmıştır. Optimizasyon ile belirlenen konsantrasyonun çıktı değerleri ile gerçek deney sonuçlarını karşılaştırmak için doğrulama deneyi yapılmış ve optimizasyon sonucunda elde edilen çıktılar ile gerçek deney sonuçları arasındaki ilişkiyi gösteren R² doğruluk değerlerinin çok iyi seviyede olduğu tespit edilmiştir.

Çalışma sonucunda, çıktı parametrelerini istenilen hedef değerler aralığında sağlayan %65,5 euro dizel yakıtı, %23,1 n-bütanol ve %11,4 nötr pamuk yağı konsantrasyonuna sahip üçlü yakıt karışımı tespit edilmiştir. Bu yakıt karışımının yakıt özellikleri incelenmiş ve standartlarda belirtilen yakıt özelliklerinin yanında özellikle soğuk akış parametrelerinin çok iyi seviyede olduğu belirlenmiştir.

ANAHTAR KELİMELER:biyoyakıt, n-bütanol, nötr pamuk yağı, yanıt yüzey yöntemi, motor karakteristikleri, soğuk akış özellikleri, dizel motoru.

ABSTRACT

INVESTIGATION OF EFFECT OF USING DIESEL FUEL- ALCOHOL-VEGETABLE OIL BLENDS ON THE ENGINE CHARACTERISTICS IN A DIESEL ENGINE

PH. D. THESIS

ALPASLAN ATMANLI

**BALIKESİR UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE
MECHANICAL ENGINEERING**

(SUPERVISOR: PROF. DR. BEDRİ YÜKSEL)

BALIKESİR, JUNE 2013

Considering environmental and economic causes using biofuel blends in diesel engine vehicles shows great importance. Vegetable oils and bioalcohols that can be generated from biomass are alternative biofuel sources for diesel engines.

In this research, to generate a blend with diesel fuel, n-butanol is used as bio-alcohol component and neutral cotton oil is used as vegetable oil component when its high potential production rate is considered with its seeded ground area in Turkey.

Components solubility properties with each other were examined with titration method in different temperatures (room temperature, 5 °C, 0 °C, -5 °C and -10 °C) and ternary phase diagrams were drawn for each temperature. Experimental fuels were prepared with experimental design method by choosing 7 different concentrations where phase decomposition did not occur in -10 °C diagram. Full load conditions of various engine speed tests were employed to determine engine characteristics in a four cylinder, four cycle, turbocharged and direct injection diesel engine by using experimental fuels. According to the experiment results of the experiment engine in the optimum brake torque period of 2200 1/min, optimization is done by using response surface method considering engine performance and exhaust emissions parameters, to identify the rates of concentrations of components in the ideal mixture of three. Confirmation tests are employed to compare the output values of concentrations that are identified by optimization and the real experiment results and the R^2 actual values that show the relation between the outputs from the optimizations and real experiments were determined in very high level.

As a result of this study, a mixture of three fuels was determined as it is comprised of 65.5% euro diesel fuel, 23.1% n-butanol and 11.4% neutral cotton oil concentration. This fuel mixture's output parameters provided the aimed results. Additionally, determined fuel blend's fuel specialties are examined and besides its standard fuel characteristics, its cold flow parameters were found in highly good level.

KEYWORDS: biofuels, n-butanol, neutral cotton oil, response surface methodology, engine characteristics, cold flow properties, diesel engine.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET, ANAHTAR SÖZCÜKLER.....	i
ABSTRACT, KEYWORDS.....	ii
İÇİNDEKİLER.....	iii
ŞEKİL LİSTESİ.....	vi
TABLO LİSTESİ.....	viii
SEMBOL LİSTESİ.....	ix
KISALTMA LİSTESİ.....	x
ÖNSÖZ.....	xı
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI.....	9
2.1 Dizel Yakıtı ile Bitkisel Yağ Karışımı.....	9
2.2 Dizel Yakıtı ile Alkol Karışımı.....	23
2.3 Dizel Yakıtı ile Üçlü Karışım.....	37
2.4 Deney Tasarımı.....	44
3. BİYOKÜTLE ENERJİSİ VE BİYOYAKITLAR.....	47
3.1 Biyokütle Enerjisi.....	47
3.2 Biyoyakıtlar.....	51
3.2.1 Bitkisel Yağlar.....	53
3.2.1.1 Bitkisel Yağların Yapısı.....	53
3.2.1.2 Yağ Asitleri.....	55
3.2.1.3 Pamuk Yağı.....	61
3.2.1.4 Pamuk Yağının Üretimi ve Tüketimi.....	63
3.2.1.5 Bitkisel Yağların Dizel Motorlarda Kullanılması.....	65
3.2.1.6 Dizel Yakıtı Olarak Bitkisel Yağın Yanma Denklemi.....	69
3.2.2 Alkoller.....	70
3.2.2.1 Alkollerin Yapısı.....	71
3.2.2.2 Alkollerin Dizel Motorlarda Kullanılması.....	74
3.2.2.3 Dizel Yakıtı Olarak n-Bütanol.....	76
3.2.2.4 Dizel Yakıtı Olarak n-Bütanolün Yanma Denklemi.....	79
4. DİZEL MOTORLARDA YANMA.....	80
4.1 Dizel Çevrimi.....	80
4.2 Dizel Motorlarda Yanma.....	81
4.3 Dizel Motorda Yanmayı Etkileyen Parametreler.....	86
4.4 Dizel Motorlardan Kaynaklanan Kirletici Emisyonlar.....	91
4.4.1 NO _x Emisyonu.....	94
4.4.2 CO Emisyonu.....	96
4.4.3 HC Emisyonu.....	97
4.4.4 İS Emisyonu.....	98
5. MATERYAL VE YÖNTEM.....	99
5.1 Materyal.....	99
5.1.1 Üçlü Karışım Bileşenleri.....	99
5.1.2 Piknometre.....	100
5.1.3 Yağ Analiz (GC) Cihazı.....	100
5.1.4 Titrasyon Düzenegi.....	101

5.1.5 Soğutma Banyosu Cihazı.....	101
5.1.6 Üç Bileşenli Faz Diyagramı için Çizim Programı.....	102
5.1.7 Motor Test Düzeneği.....	102
5.1.7.1 Deney Motoru.....	104
5.1.7.2 Motor Test Cihazı.....	105
5.1.7.3 Yakıt Ölçer.....	107
5.1.7.4 Isı Değiştirici.....	108
5.1.7.5 Nem ve Sıcaklık Ölçer.....	109
5.1.7.6 Egzoz Gazı Analiz Cihazı.....	110
5.1.8 Deney Tasarımı Programı.....	111
5.1.9 Yüzey Grafikleri Çizdirme Programı.....	111
5.2 Yöntem.....	111
5.2.1 Bileşen Yoğunluklarının Ölçülmesi.....	111
5.2.2 Çözünürlük ve Mikroemülsiyon Yöntemi.....	112
5.2.2.1 Bileşenlerin Çözünürlük İlişkisi.....	114
5.2.2.2 Mikroemülsiyon Yöntemi.....	116
5.2.2.3 Titrasyon Deneyi.....	119
5.2.3 Üçlü Karışım Faz Diyagramının Çizilmesi.....	123
5.2.4 Yanıt Yüzey Yöntemi ve Deney Tasarımı.....	126
5.2.4.1 Yanıt Yüzey Yöntemi (RSM).....	127
5.2.4.2 Deney Tasarımı.....	128
5.2.5 Deney Tasarımında Kullanılan Üçlü Karışımlar.....	129
5.2.6 Deneysel Çalışmada RSM İşlem Sırası.....	131
5.2.7 Deney Yakıtlarının Hazırlanması.....	132
5.2.7.1 Üçlü Karışımların Hesaplanan Yakıt Özellikleri.....	133
5.2.8 Motor Performansı ve Egzoz Emisyon Deneyi Aşamaları.....	135
5.2.9 Motor Performans Hesaplamaları.....	136
5.2.9.1 Moment ve Güç.....	136
5.2.9.2 Özgül Yakıt Tüketimi.....	138
5.2.9.3 Efektif Verim.....	138
5.2.9.4 Ortalama Efektif Basınç.....	138
5.2.10 Deney Sonuçları ile RSM Uygulaması.....	139
5.2.10.1 Matematiksel Modelin Kurulması.....	140
5.2.10.2 RSM ile Optimizasyon.....	142
5.2.10.3 Optimize Karışımın Doğrulama Deneyi.....	143
5.2.11 Yüzey Grafiklerinin Çizilmesi.....	144
6. BULGULAR.....	145
6.1 Deney Yakıtlarının Yoğunlukları.....	145
6.2 Nötr Pamuk Yağı Yağ Asit Kompozisyonu.....	145
6.3 Mikroemülsiyon ile Faz Diyagramları.....	146
6.3.1 Sıcaklığın ve Karışım Oranının Çözünürlüğe Etkisi.....	146
6.4 Optimizasyon Sonucu.....	150
6.4.1 Optimum ile Doğrulama Deneyi Sonuçlarının Karşılaştırılması.....	151
6.4.2 Optimum Üçlü Karışımın Oranı.....	151
6.5 Optimum Karışımın Yakıt Analizi.....	153
6.6 Matematiksel Modelin Yüzey Grafikleri.....	154

6.6.1 Motor Performans Parametreleri.....	155
6.6.1.1 Moment.....	155
6.6.1.2 Efektif Güç.....	157
6.6.1.3 Özgül Yakıt Tüketimi.....	159
6.6.1.4 Efektif Verim.....	161
6.6.1.5 Ortalama Efektif Basınç.....	163
6.6.2 Egzoz Emisyon Parametreleri.....	165
6.6.2.1 NO Emisyonu.....	165
6.6.2.2 NO ₂ Emisyonu.....	168
6.6.2.3 NO _x Emisyonu.....	169
6.6.2.4 CO Emisyonu.....	170
6.6.2.5 HC Emisyonu.....	172
6.6.2.6 CO ₂ Emisyonu.....	174
6.6.2.7 O ₂ Emisyonu.....	176
7. BELİRSİZLİK ANALİZİ.....	178
8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	180
8.1 Sonuçlar.....	183
8.2 Öneriler.....	190
9. KAYNAKLAR.....	192

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1: Enerji çeşitlerine göre 2011 yılı dünya enerji tüketimi.....	1
Şekil 1.2: Enerji çeşitlerine göre 2011 yılı Türkiye enerji tüketimi.....	2
Şekil 3.1: Dünya enerji talebi ve enerji kaynakları.....	48
Şekil 3.2: Biyokütlenin hammaddesi ve tüketimi.....	49
Şekil 3.3: Karbon döngüsü, fotosentez ve biyokütle teknolojisinin basamakları....	50
Şekil 3.4: Biyokütleden elde edilebilen katı, sıvı ve gaz yakıtlar.....	51
Şekil 3.5: Üretim teknolojisine göre biyoyakıtlar.....	52
Şekil 3.6: Yağ asitlerinin gliserinle esterleşmesi.....	54
Şekil.3.7: Basit ve karışık trigliseritin yapısı.....	55
Şekil.3.8: Yağ asitlerinin yapısı.....	56
Şekil.3.9: Pamuk bitkisi ve yağı.....	61
Şekil.3.10: Bitkisel yağın dizel motorlarda kullanılma yöntemleri.....	67
Şekil.3.11: Metanol, Etanol ve n-Bütanol molekül yapısı.....	71
Şekil 3.12: Biyokütleden bütanol üretim prosesi.....	72
Şekil 3.13: Bütanol izomerleri ve molekül yapısı.....	77
Şekil 4.1: Dört zamanlı bir dizel motorunun çevrimi.....	80
Şekil 4.2: Yakıt damlacığının hava ile teması.....	81
Şekil 4.3: DEC modeline göre püskürtme formasyonu.....	82
Şekil 4.4: Dizel motorlarında basınç-krank mili açısı değişim diyagramı.....	83
Şekil 4.5: Dizel motorunda yakıtın yanması sonucu oluşan ana kirleticiler.....	92
Şekil 4.6: Direkt püskürtmeli bir dizel motorunda emisyon konsantrasyonları.....	94
Şekil 4.7: NO ₂ molekülü.....	95
Şekil 4.8: CO molekülü.....	96
Şekil 4.9: HC molekülü.....	97
Şekil 4.10: PM molekülü.....	98
Şekil 5.1: Üçlü karışım bileşenleri.....	99
Şekil 5.2: Boot tipi piknometre.....	100
Şekil 5.3: GC cihazı ve kolonu.....	100
Şekil 5.4: Titrasyon düzeneği.....	101
Şekil 5.5: Soğutma banyosu cihazı.....	101
Şekil 5.6: Üç bileşenli faz diyagramı çizim programı.....	102
Şekil 5.7: Motor test düzeneğinin genel görünümü.....	103
Şekil 5.8: Motor test düzeneğinin şematik görünümü.....	103
Şekil 5.9: Deney motorunun genel görünümü.....	104
Şekil 5.10: Motor test cihazının genel görünümü.....	105
Şekil 5.11: Kontrol paneli.....	106
Şekil 5.12: Ekran görüntüsü.....	106
Şekil 5.13: Yakıt ölçerin genel görünümü.....	107
Şekil 5.14: Isı değiştirici.....	108
Şekil 5.15: Atmosfer basınç, sıcaklık ve nem ölçer.....	109
Şekil 5.16: Gaz analiz cihazı genel görünümü.....	110
Şekil 5.17: Piknometre ile yoğunluk ölçme işlemi.....	112
Şekil 5.18: Emülsiyon oluşturma süreci.....	116

Şekil 5.19: Karışımın fiziksel görünüşü.....	118
Şekil 5.20: Titrasyon düzeneği şematik görünümü.....	119
Şekil 5.21: 20 g'lık karışımlar.....	120
Şekil 5.22: Soğutulmuş karışımlar.....	120
Şekil 5.23: Titrasyon işlemi.....	121
Şekil 5.24: Titre edilen karışımlar.....	121
Şekil 5.25: Üçgen faz diyagramını okuma yöntemi.....	123
Şekil 5.26: Üçlü karışım faz diyagramları.....	125
Şekil 5.27: Bir sistemin genel yapısı.....	126
Şekil 5.28: Deney tasarımı.....	128
Şekil 5.29: Deney tasarımında kullanılan üçlü karışımlar.....	130
Şekil 5.30: RSM işlem sırası.....	131
Şekil 5.31: Karışım hazırlama.....	132
Şekil 5.32: Deney yakıtları.....	136
Şekil 5.33: Terazı ve yük hüccresını genel görünümü.....	137
Şekil 5.34: Optimizasyon süreci.....	142
Şekil 5.35: Çıktıların yüzey grafiği.....	144
Şekil 6.1: -10 °C için çizilen üçlü karışım faz diyagramı.....	147
Şekil 6.2: Optimizasyon parametreleri ve değerleri.....	150
Şekil 6.3: Optimize yakıtı tasarlama süreci.....	152
Şekil 6.4: Üçlü karışım oranına bağlı moment değişimleri.....	156
Şekil 6.5: Üçlü karışım oranına bağlı efektif güç değişimleri.....	158
Şekil 6.6: Üçlü karışım oranına bağlı özgül yakıt tüketimi değişimleri.....	159
Şekil 6.7: Üçlü karışım oranına bağlı efektif verim değişimleri.....	161
Şekil 6.8: Üçlü karışım oranına bağlı ortalama efektif basınç değişimleri.....	163
Şekil 6.9: Üçlü karışım oranına bağlı NO emisyonu değişimleri.....	166
Şekil 6.10: Üçlü karışım oranına bağlı NO ₂ emisyonu değişimleri.....	168
Şekil 6.11: Üçlü karışım oranına bağlı NO _x emisyonu değişimleri.....	169
Şekil 6.12: Üçlü karışım oranına bağlı CO emisyonu değişimleri.....	171
Şekil 6.13: Üçlü karışım oranına bağlı HC emisyonu değişimleri.....	173
Şekil 6.14: Üçlü karışım oranına bağlı CO ₂ emisyonu değişimleri.....	174
Şekil 6.15: Üçlü karışım oranına bağlı O ₂ emisyonu değişimleri.....	176

TABLO LİSTESİ

Sayfa

Tablo 1.1: Dünya petrol tüketimleri (milyon varil/gün).....	3
Tablo 3.1: Bitkisel ve hayvansal yağlarda bulunan yağ asitlerinin özellikleri.....	56
Tablo 3.2: Yağ asidinin yakıt özelliklerine etkisi.....	58
Tablo 3.3: Bazı yağların yakıt özellikleri.....	59
Tablo 3.4: Pamuk yağının yağ asidi kompozisyonu.....	62
Tablo 3.5: Dünya pamuk üretimi (1000 ton-lif).....	64
Tablo 3.6: Dünya pamuk tüketimi (1000 ton-lif).....	65
Tablo 3.7: Etanol ve n-bütanolün yakıt özellikleri.....	76
Tablo 4.1: Yakıt türüne göre Türkiye'deki motorlu kara taşıtı sayısı.....	91
Tablo 4.2: Ağır ticari dizel motorları için AB emisyon standartları (g/kWh).....	93
Tablo 5.1: Deney motorunun teknik özellikleri.....	104
Tablo 5.2: Motor test cihazının teknik özellikleri.....	105
Tablo 5.3: Yakıt ölçerin teknik özellikleri.....	107
Tablo 5.4: Atmosfer basınç, sıcaklık ve nem ölçerin teknik özellikleri.....	109
Tablo 5.5: Gaz analiz cihazı teknik özellikleri.....	110
Tablo 5.6: Yakıt bileşenlerinin soğuk akış özellikleri.....	120
Tablo 5.7: Titrasyon deneyinde sıcaklığa bağlı konsantrasyonlar	122
Tablo 5.8: Üçlü karışımların hacimsel oranları.....	130
Tablo 5.9: Bilinen ve hesaplanan yakıt özellikleri.....	134
Tablo 5.10: 2200 d/dk.'daki deney çıktıları.....	140
Tablo 5.11: Matematiksel modelin katsayıları.....	141
Tablo 5.12: RSM çıktıları ve R^2 değerleri.....	141
Tablo 5.13: Optimizasyon parametre değerleri.....	143
Tablo 5.14: Optimize karışımın çıktı değerleri.....	143
Tablo 6.1: Bileşenlerin yoğunlukları.....	145
Tablo 6.2: Nötr pamuk yağının yağ asit kompozisyon değerleri.....	145
Tablo 6.3: Çıktı değerlerinin karşılaştırılması.....	151
Tablo 6.4: DnBP ve euro dizel yakıtının yakıt analizi.....	153
Tablo 6.5: Motor performans parametrelerinin karşılaştırması.....	155
Tablo 6.6: Egzoz emisyon parametrelerinin karşılaştırması.....	165
Tablo 7.1: Ölçü aletlerinin belirsizlik değerleri.....	179
Tablo 7.2: Hesaplanan büyüklüklerin belirsizlik değerleri.....	179
Tablo 8.1: DnBP yakıtının motor karakteristikleri.....	189

SEMBOL LİSTESİ

λ	: Hava fazlalık katsayısı
ρ	: Yoğunluk
m	: Kütle
v	: Hacim
T1	: Titrasyon numarası
β	: Matematiksel model sabit katsayısı
x_i	: Karışım içindeki bileşenin konsantrasyonu
R^2	: Doğrulama değeri
y	: Matematiksel model çıktı değeri
b_e	: Özgül yakıt tüketimi
B_e	: Saatlik yakıt tüketimi
η_e	: Efektif verim
H_u	: Alt ısı değer
P_e	: Efektif güç
P_{me}	: Ortalama efektif basınç
V_H	: Toplam kurs hacmi
n	: Motor devri
M_d	: Döndürme momenti
P	: Basınç
dp/dt	: Basınç artış hızı
K_d	: Güç düzeltme faktörü
η_k	: Kinematik viskozite
R	: Belirsizlik değişkeni
w	: Hata oranı
h	: Saat
s	: Saniye
T	: Sıcaklık
$^{\circ}C$: Derece (santigrat, selsiyus)

KISALTMA LİSTESİ

ASTM	: Amerikan test ve materyal topluluğu
ABE	: Aseton-bütanol-etanol fermantasyonu
A.Ö.N	: Alt ölü nokta
BSFC	: Özgül yakıt tüketimi
BSEC	: Enerji tüketimi
BTE	: Isıl verim
CC	: Karbon bileşimi
CO	: Karbonmonoksit
CO₂	: Karbondioksit
CH₃OH	: Metanol
C₂H₅OH	: Etanol
C₄H₉OH	: Bütanol
DIN	: Alman standart enstitüsü
d/dk.	: Devir / Dakika
D	: Euro dizel yakıtı
EN	: Avrupa normu
EC	: Avrupa komisyonu
ECE	: Avrupa ekonomik komisyonu
ELR	: Avrupa emisyon yükleme standardı
ESC	: Avrupa sabit çevrimi
EPA	: Çevre koruma örgütü
EGR	: Egzoz gazı geri dönüşümü
GC	: Gaz kromatografisi
HFk	: Hava fazlalık katsayısı
H /Y	: Hava yakıt oranı
Y/H	: Yakıt hava oranı
HC	: Hidrokarbon
ISO	: Uluslararası standart organizasyonu
°KMA	: Krank mili açısı
kW	: KiloWatt
LPG	: Sıvılaştırılmış petrol gazı
MTEP	: Milyon ton eşdeğer petrol
ME	: Metilester
NaOH	: Sodyumhidroksit
nB	: n-bütanol
NO_x	: Azot oksitler
OECD	: Ekonomik işbirliği ve gelişim organizasyonu
PM	: Partikül madde
ppm	: Milyonda bir parçacık
PAH	: Polisayklik aromatik hidrokarbonlar
P	: Nötr pamuk yağı
RSM	: Response surface methodology (Yanıt yüzey yöntemi)
SS	: Setan sayısı
TG	: Tutuşma gecikmesi
Ü.Ö.N	: Üst ölü nokta
DnBP	: %65,5 Euro dizel, %23,1 n-bütanol, %11,4 nötr pamuk yağı

ÖNSÖZ

Tez çalışmam süresince değerli yorum, öneri ve yol göstermeleri ile çalışmama katkıda bulunan, her zaman bilgi ve tecrübesiyle desteğini esirgemeyen tez danışmanım Sayın Prof. Dr. Bedri YÜKSEL'e en içten teşekkürlerimi sunarım.

Tezin şekillenmesi için göstermiş oldukları katkılardan dolayı tez izleme komitesi üyeleri Sayın Prof. Dr. H. Serdar YÜCESU ve Doç. Dr. Nadir İLTEN'e,

Tez çalışmamı bilimsel araştırma projesi olarak destekleyen Balıkesir Üniversitesi Rektörlüğü ve Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi çalışanlarına,

Bitkisel yağ temininde ve yağ analizinde yardımcı olan Kula Yağ Fabrikası çalışanlarına,

Laboratuvar çalışmalarımnda değerli katkıları ile her türlü desteği sağlayan ve çalışmalarını arasında zaman ayırmaları nedeniyle Kimya Bölümü Öğretim Üyesi Sayın Yrd. Doç. Dr. Yasemin TURHAN ve değerli arkadaşım Biyoloji Bölümü Araştırma Görevlisi Serhat ONAD'a,

Deney tasarımı çalışmasında katkı sağlayan Endüstri Mühendisliği Öğretim Üyesi Sayın Yrd. Doç. Dr. Aslan Deniz KARAOĞLAN'a,

Tez çalışmam kapsamında yaptığım deneysel çalışmalarda bilgi ve tecrübesiyle destek olan değerli arkadaşım Sayın Dr. Öğ. Yzb. Erol İLERİ'ye,

Görev yapmakta olduğum K. K. Astsubay Meslek Yüksek Okul Komutanlığı Makine Bölüm Başkanlığı'ndan, Öğ. Yzb. Emre AYTAV'a, Dr. Öğ. Yzb. Recep ÇAKIR'a ve ayrıca 6'ncı Ana Bakım Komutanlığı personeline teşekkürlerimi sunarım.

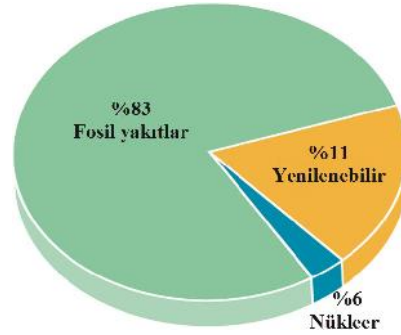
Benden manevi desteklerini hiç esirgemeyen ve başarıım için bütün maddi imkânlarını seferber eden aileme çok teşekkür ederim.

Çalışmalarım boyunca her zaman büyük bir sabır ve özveriyle yanımda olan sevgili eşim Tuba ve biricik oğlum Ömer Alp'e sevgilerimi sunarım.

1. GİRİŞ

Enerji günlük yaşantımızda önemli bir rol oynamaktadır ve her ülkenin sosyo-ekonomik gelişiminde de aynı öneme sahiptir [1]. Dünyada nüfus artışı, sanayileşme ve kentleşme olguları, küreselleşme sonucu artan ticaret olanakları doğal kaynaklara ve enerjiye olan talebi giderek artırmaktadır. Güvenilir, ucuz ve temiz enerji arzı günümüzün en önemli sorunu haline gelmiştir. Türkiye'nin de içinde bulunduğu birçok ülkede, sosyal ve ekonomik kalkınmanın temel girdisi olan enerjiye gün geçtikçe daha çok gereksinim duyulmaktadır.

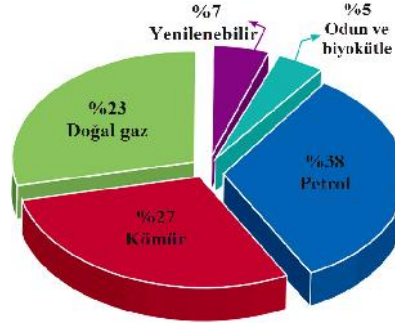
Nüfus artışı ve teknolojik gelişmeler, dünya enerji tüketiminin de her yıl artacağını göstermektedir. Dünya birincil enerji kaynakları tüketiminde 2012 yılında 2011 yılına göre %2,5 artış kaydedilmiştir. Günümüzde fosil yakıtların enerji tüketimindeki baskın payı sürmektedir. 2011 yılında tüketilen 12 milyon ton eşdeğer petrol (MTEP) enerjinin %33'ü petrol, %28 kömür, %22'si doğal gaz, %6'sı nükleer ile geri kalan %11'lik kısmı ise diğer enerji kaynaklarıyla karşılanmıştır [2,3]. Enerji çeşitlerine göre 2011 yılı dünya enerji tüketimi Şekil 1.1'de gösterilmektedir.



Şekil 1.1: Enerji çeşitlerine göre 2011 yılı dünya enerji tüketimi

Türkiye'de birincil enerji tüketimi 2011 yılında %38 petrol, %27 kömür, %23 doğalgaz, %12 hidrolik enerjinin de dâhil olduğu yenilenebilir enerji kaynaklarından karşılanmıştır. 2011 yılında Türkiye'de tüketilen petrolün %6'sı, doğal gazın ise ancak %2'si yerli üretimden karşılanmıştır. Türkiye'nin artan enerji talebi karşısında kendi enerji kaynaklarının sınırlı olması, başta petrol ve doğal gaz olmak üzere, enerji kaynaklarının ithaline bağımlılığı da beraberinde getirmiştir. Bu nedenle petrol

ve doğal gazda %90'ın üzerinde dışa bağımlılık söz konusudur [4-6]. Enerji çeşitlerine göre 2011 yılı Türkiye enerji tüketimi Şekil 1.2'de gösterilmektedir.



Şekil 1.2: Enerji çeşitlerine göre 2011 yılı Türkiye enerji tüketimi

Günümüzde, dünya enerji ihtiyacının önemli bir bölümünü karşılamakta olan fosil yakıt rezervlerinin kullanım hızı sürekli artmaktadır. Özellikle kalkınmakta olan ülkelerin fosil yakıt taleplerinde kesintisiz bir artış söz konusudur [8]. 2011 yılında dünya petrol talebi bir önceki yıla göre %0,8 oranında artarak günlük ortalama 89 milyon varil olarak gerçekleşmiştir [2].

Ulaştırma sektöründe petrol kaynaklı sıvı yakıtlar kullanılmaktadır. 2011 yılı dünya petrol tüketiminin %54'lük bölümü karayolu, havacılık, denizcilik ve demiryolu taşımacılığında oluşan ulaşım sektöründe, %18'i sanayi sektöründe, %11'i evsel, ticari ve tarımsal alanda, %10'u petrokimya sektöründe, %7'si elektrik üretiminde gerçekleşmiştir [9,10]. 2020 yılına kadar sektörel bazda petrol tüketim değişiminin öngörülerine göre, petrol tüketimindeki artışın %74'ünün ulaşım sektöründe olacağı tahmin edilmektedir. Bu nedenle, gelecek dönemlere ilişkin petrol tüketimi öngörülerinde, dünya araç parkındaki ve kişi başına düşen araç sayısındaki değişim büyük önem arz etmekte olup, bu oranlar petrol üreten ülkeler tarafından yakından takip edilmektedir. 2009 yılı istatistiklerine göre dünyada bulunan yaklaşık 870 milyon otomobilin %70'i, Türkiye'nin de içinde bulunduğu OECD ülkelerinde bulunmaktadır [7,10].

Karayolu taşımacılığının iki temel yakıtı olan benzin ve motorin tüketimlerinin dünya üzerindeki dağılımı Tablo 1.1'de gösterilmektedir [7]. Genel toplamda benzin ve motorin yakıtlarının tüketim değerleri birbirine oldukça yakın olmakla birlikte, benzin ve motorin yakıtlarının tüketim yoğunluklarına göre bölgelerin birbirlerinden

ayrıştığı görülmektedir. Bu ayrıma göre OECD üyesi olan Kuzey Amerika ve Japonya benzin-yoğun bölgeler, Avrupa ve Asya ise motorin-yoğun bölgeler olmaktadır.

Tablo 1.1: Dünya petrol tüketimleri (milyon varil/gün)

Bölgeler		Benzin		Motorin	
		Günlük Tüketim	Dünyadaki Payı	Günlük Tüketim	Dünyadaki Payı
OECD	Kuzey Amerika	10,04	%46	4,05	%17
	OECD Avrupa	2,08	%9	4,49	%19
	OECD Pasifik	1,55	%7	1,15	%5
	OECD Toplam	13,67	%62	9,69	%41
OECD Dışı	OECD Dışı Toplam	8,54	%38	13,78	%59
Dünya		22,21	%100	23,47	%100

Ulaşım sektöründe dünya genelinde artan motorlu taşıt sayısına paralel olarak Türkiye’de de taşıt sayısı her geçen yıl artmaktadır. Bu artış içinde en büyük payı da dizel yakıtı kullanan araçlar almaktadır. Ayrıca, dizel motorlar karayolu taşımacılığı haricinde ağır iş makinelerinde güç üretiminde, jeneratörlerde ve endüstriyel alanda da yaygın bir şekilde kullanılmaktadır.

Türkiye’de, 2004 yılında dizel yakıtı kullanan motorlu kara taşıtlarının sayısı 3.346.355 iken, 2011 yılında %106,18 oranında artarak 6.899.420 değerine ulaşmıştır. 2011 yılında dizel yakıtı kullanan motorlu kara taşıtları sayısı, toplam kayıtlı 16.089.528 olan motorlu kara taşıt sayısının yaklaşık %43’ünü oluşturmaktadır [11]. Dizel motorlu taşıtların toplam taşıt miktarı içindeki oranının hızlı bir şekilde yükselmesi, dizel yakıtına olan talebin de artmasına neden olmuştur [11]. 2011 yılı itibariyle yurt içinde toplam 17,5 milyon ton akaryakıt satışı gerçekleştirilmiştir. Bunun yaklaşık 2 milyon tonu benzin türleri, 14,7 milyon tonu motorin türleri ve 0,8 milyon tonu da fuel-oil türleri olarak gerçekleşmiştir [7].

Dünya genelindeki üretim ve tüketim faaliyetleri sonucu atmosfere kirletici bileşenler yayılmaktadır. Bu kirleticilerin büyük bir bölümü fosil kökenli yakıtlardan

kaynaklanmaktadır. Motorlu taşıt sayısının her geçen gün artmasına paralel olarak, bu taşıtların egzozlarından kaynaklanan kirleticilerin toplam atmosfer kirliliğindeki payı da artmaktadır. Atmosferin bileşimindeki küçük farklılaşmalar bile büyük iklimsel değişmelere yol açabilmektedir. Türkiye’inde 2009 yılında imzaladığı atmosferdeki sera etkisini düzenleyen Kyoto protokolünde karbondioksit (CO₂) en büyük paya sahiptir [12]. CO₂ emisyonu dünya genelinde 2010 yılında 2009 yılına göre %4,6 artış göstermiştir. 2010 yılında atmosfere salınan toplam CO₂ emisyonunun %36’sı petrol kaynaklıdır ve bunun %22’si de ulaştırma sektöründen kaynaklanmaktadır [13].

Dünyadaki CO₂ emisyon seviyesinin artması sonucu oluşan küresel ısınma, petrol rezervlerinin hızla tükenmesi, petrol temininde yaşanan sıkıntılar ve fiyatlardaki istikrarsızlıklar birçok devletin yeni enerji politikaları oluşturmasında etken oluşturmaktadır. Özellikle 1970’lerin başında yaşanan petrol krizi ve sonrasında gelen petrol ambargoları süreci gelişmiş ülkeleri enerji konusunda acil olarak önlemler almaya yöneltmiştir [14-16]. Bu önlemlerin başında petrol tüketimin en fazla olduğu ulaştırma sektörünün yakıt ihtiyacının sürdürülebilir, ekonomik ve çevreye dost olacak alternatif yakıt kaynaklarından karşılanabilmesi gelmektedir.

Ulaştırma sektöründe en fazla kullanılan dizel motorlarına alternatif yakıt olabilecek yenilenebilir enerji kaynakları içerisinde en büyük teknik potansiyele “biyokütle” sahiptir. Ana bileşenleri karbonhidrat bileşikleri olan bitkisel ve hayvansal kökenli tüm biyolojik maddeler biyokütle enerji kaynağıdır. Bu kaynaklardan üretilen yakıtlar ise “biyoyakıt” olarak tanımlanmaktadır [17,18]. Sürdürülebilir enerji kaynağı olan biyoyakıtlar, sera gazı emisyonunu önemli ölçüde azaltan, hava kalitesini artıran, petrol ithalatında daha az bağımlılık, istihdam ve yeni pazarlar için önemli bir enerji kaynağıdır [17]. Biyokütle potansiyeli yüksek olan ülkelerde biyoyakıt olarak bitkisel yağlar ve biyoalkoller ön plana çıkmaktadır.

Bitkisel yağlar ve biyoalkollerin kaynağını oluşturan biyokütlelerin sürekli temin edilebilmesi, yenilenebilir olmaları, kimyasal yapılarındaki oksijen sayesinde kirletici egzoz gazlarının düşük olması bitkisel yağların ve biyoalkollerin dizel motorlarda alternatif yakıt olarak kullanılmasında avantaj sağlamaktadır.

Dünyada yaşanan petrol krizlerine kadar petrol kökenli yakıtların ucuz ve bol miktarda bulunur olması motorların teknolojik yönden petrol ürünleriyle çalışacak şekilde gelişmesini sağlamıştır. Yenilenebilir kaynaklardan elde edilen biyoyakıtların dizel motorlarda doğrudan kullanılması durumunda, motorda modifikasyon yapmak gerekmektedir. Bu nedenle literatürde dizel yakıtı ile biyoyakıtların çeşitli oranlarda karıştırılması yönündeki çalışmalara ağırlık verilmiştir ve dizel yakıtı ile bitkisel yağ ve dizel yakıtı ile biyoalkol karışımlarının dizel motorlarında alternatif yakıt olarak kullanılabilmesi ile ilgili çalışmalar uzun süreden beri devam etmektedir.

Bitkisel yağların dizel motorlarında kullanılması ile ilgili yapılan bütün çalışmalarda bitkisel yağların yüksek viskoziteye sahip olması temel sorun olarak gösterilmektedir [18-22]. Yüksek viskozitenin motorda yol açtığı olumsuzluklara bitkisel yağın soğuk akış özellikleri de (yüksek akma, bulutlanma ve soğukta filtre tıkanma noktası) katkıda bulunmaktadır ve karışım yakıtlarında düşük sıcaklıklarda faz ayrışması meydana gelmektedir. Bu durum da dizel yakıt sisteminde ve yanma sürecinde istenmeyen sonuçlara neden olmaktadır [23-28]. Dizel yakıtı ile bitkisel yağ karışımlarının alternatif yakıt olarak kullanıldığı çalışmalar haricinde, bitkisel yağların bir katalizör eşliğinde kısa zincirli bir alkol ile reaksiyonu sonucunda açığa çıkan, yakıt amaçlı ürün olarak tanımlanan ve biyoyakıt olan biyodizel (biyomotorin) yakıtı geliştirilmiştir [29-31]. Ancak biyodizelin üretiminde ve kullanımında çeşitli olumsuzluklar ortaya çıkmaktadır. Bunlar; biyodizelin üretim maliyetinin yüksek olması, üretimde açığa çıkan gliserini değerli bir ürün haline getirmek için ilave enerjinin harcanması, 0 °C'nin altındaki düşük sıcaklıklarda soğuk akış özelliklerinin olumsuzluk yaratması ve NO_x emisyonunun dizel yakıtına göre artış göstermesi şeklinde sıralanmaktadır [16,21,25,32-34].

Alkollerin dizel yakıtı ile çeşitli oranlarda karışım oluşturarak kullanılması ile ilgili yapılan çalışmalarda en çok metanol (CH₃OH) ve etanol (C₂H₅OH) kullanılmaktadır. Etanol yenilenebilir biyokütlenin fermantasyonu ile üretilebilirken, metanol ise kömür ve petrol türevli maddelerden üretilmektedir. Bundan dolayı etanol metanole göre yenilenebilir ve geniş kullanım potansiyeline sahiptir [34-37]. Ancak etanolün dizel motorlarda dizel yakıtı ile karışım oluşturma şeklinde kullanılmasında 10 °C'nin altındaki sıcaklıklarda faz ayrışması gerçekleşmektedir.

Bu ayrışmayı engellemek ve homojen bir karışım oluşturmak için hem etanol ile hem de dizel yakıtı ile çözünebilir ortak çözücü kullanılması gerekmektedir [38-41]. Etanol ve metanolün dizel motorlarda gösterdiği olumsuz özellikleri giderebilecek, bu alkollere göre daha avantajlı ve rakip olabilecek nitelikte olan biyoalkol çeşidi olarak bütanol (C_4H_9OH) gösterilmektedir [42-47]. Bütanolün düz zincirli molekül yapısına sahip izomerlerinden biri olan n-bütanol (1-bütanol) etanole göre çok düşük korozyon oluşturma riski, yüksek ısı değeri, yüksek setan sayısı, düşük polarite ve ayrıca ortak çözücü özelliği sayesinde apolar özellik gösteren dizel yakıtı ve bitkisel yağlarla çok iyi karışım oluşturma gibi üstünlükleri bulunmaktadır [35,48,49]. Dizel yakıtı ile karışım oluşturmada n-bütanol bu özellikleriyle etanole göre tercih edilecek bir alkol çeşidi olmaktadır. Dizel motorlarda kullanılan biyoalkoller ile ilgili yapılan çalışmalar incelendiğinde, n-bütanolün alternatif yakıt olarak kullanılması ile ilgili sınırlı sayıda çalışma olmasına rağmen, son yıllarda dizel motorlar için giderek önemli hale gelmektedir [35,37,41].

Türkiye'nin de üyesi olmayı hedeflediği Avrupa Birliği'nde 2020 yılına kadar ulaştırma sektöründeki biyoyakıt kullanım oranının %10'a ulaşması hedeflenmiştir [17,37]. İnsan sağlığına ve çevreye verdiği zararlı etkileri ile Türkiye'nin sürdürülebilir ve insani kalkınma hedefi açısından fosil kaynaklı yakıtların kullanımına, yenilenebilir biyoyakıt kullanılarak sınırlama getirilmesi çok önemlidir. Bu nedenle, öz kaynaklardan yararlanılarak dizel motor yakıtı olarak kullanılacak yenilenebilir ve alternatif yakıt veya yakıt karışımlarının tasarlanması bu alandaki enerji ihtiyacına cevap verebilecektir.

Dünyada en çok pamuk üreten ilk 7 ülke sırasıyla Çin, Hindistan, ABD, Pakistan, Brezilya, Özbekistan ve Türkiye'dir. Pamuk, dünyada soya fasulyesinden sonra ikinci önemli bitkisel yağ kaynağıdır. Dünya pamuk yağı üretimi 3,8-4,3 milyon ton arasında değişirken ülkemizde 130-150 bin ton arasında olup bitkisel yağ ihtiyacımızın %25'ini karşılamaktadır. Üretim tüketim dengesi açısından değerlendirildiğinde, Türkiye'nin ihtiyacını karşılayacak yeterlilikte görülmektedir. Hatta bazı yıllarda üretim değerleri tüketim değerlerinin üzerine çıkmıştır. Türkiye'de üretimi yapılan pamuk yağı dışındaki diğer bitkisel yağlar gıda amaçlı tüketimi karşılayamamaktadır. Bu nedenle öz kaynaklardan üretilen bu yağların alternatif yakıt olarak kullanılması mümkün olmayacaktır [50-52].

Türkiye'nin ekili alanları dikkate alındığında yüksek üretim potansiyeli bulunan ve özellikle Ege ve Marmara bölgesi için önemli bir potansiyele sahip pamuk yağı ülkemizde kullanılan dizel motorları için alternatif bir biyoyakıt kaynağı olabilecek seviyededir. Aynı zamanda pamuk yağı, yakıt özellikleri bakımından dizel yakıtına yakın özellik sergilemektedir [53-55]. Pamuk yağı, ambalajlı gıdalarda karışım yağı olarak kullanılabilir. Bu durum pamuk yağının gıda güvencesinde en az risk oluşturan bitkisel yağ sınıfına sokmaktadır. Literatürde pamuk yağı gıda amaçlı büyük çaplı uygulama alanı bulunmayan ve doğrudan yenilemeyen yağlar arasında yer almaktadır [21,50,56,57].

Dizel yakıtına alternatif olabilecek yakıtlar teknik, ekonomik ve çevresel yönden kabul edilmeli ve hammadde temini kolay olmalıdır [15,16]. Sıralanan bu kriterlere göre bitkisel yağların gıda amaçlı olarak yaygın tüketilemeyen veya yenmeyen nitelikte olması önem kazanmaktadır. Bu özelliklere sahip bir bitkisel yağ ile dizel yakıtı karışımlarında, karışımın kararlılığını sağlamak için üçüncü bileşen olarak biyokütleden üretilebilen ve ortak çözücü özelliğine sahip alkolün kullanılması durumunda, dizel yakıtı ile bitkisel yağ karışımlarının düşük sıcaklıklarda gösterdiği faz ayrışması gibi olumsuz özellikleri giderilebilecektir. Ayrıca, biyodizel üretilmesine gerek duyulmadan biyodizelin üretim maliyetinden ve yakıt olarak kullanımındaki soğuk akış özelliklerinden kaynaklanan sorunlar da ortadan kaldırılabilir.

Çalışmanın bu yönüyle, dizel motorlarda kullanılacak alternatif yakıt karışımlarındaki biyoyakıt kullanım oranının artırılması ve düşük sıcaklıklarda kullanılacak yakıt karışımlarının soğuk akış özelliklerinin iyileştirilmesine yönelik yapılacak çalışmalara olumlu yönde katkı sağlayacağı değerlendirilmektedir.

Dizel yakıtına alternatif olacak üç bileşenli yakıt karışımı tasarlamak amacıyla, üçlü karışım yakıtında euro dizel yakıtı ile birlikte bitkisel yağ bileşeni olarak nötr pamuk yağı ve biyoalkol bileşeni olarak da n-bütanol kullanılarak yapılan bu çalışmada;

1- Bir yakıtın dizel motorlarda yakıt olarak kullanılabilmesi için düşük sıcaklıklarda berrak ve kararlı bir faz davranışı sergilemesi gerekmektedir [58]. Bu nedenle euro dizel yakıtı, n-bütanol ve nötr pamuk yağı üçlü karışımlarının soğuk

akış özellikleri dikkate alınarak bileşenlerin farklı sıcaklıklarda (oda sıcaklığı (24 °C), 5 °C, 0 °C, -5 °C ve -10 °C) birbirleri ile olan çözünürlük ilişkileri titrasyon yöntemi kullanılarak incelenmiştir. Her sıcaklık değeri için yapılan titrasyon sonucunda üç bileşenin birbiri ile olan çözünürlük ilişkisini gösteren üçlü karışım faz diyagramları çizilmiştir.

2- Üçlü yakıt karışımının soğuk akış özellikleri bakımından kararlı bir davranış sergilemesi için en düşük sıcaklık değeri olan -10 °C için çizilen faz diyagramı dikkate alınmıştır. -10 °C'deki faz diyagramının faz ayrışmasının gerçekleşmediği alanındaki konsantrasyonlar arasından deney tasarımı metodu kullanılarak seçilen 7 farklı üçlü karışıma ait motor performansı ve egzoz emisyon deneyleri yapılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda elde edilen motor performansı ve egzoz emisyon çıktı parametreleri dikkate alınarak en ideal üçlü karışım içerisindeki bileşen konsantrasyonlarının belirlenmesi için yanıt yüzey metodu (RSM) kullanılarak optimizasyon yapılmıştır. Yapılan optimizasyon sonucunda bir yakıt karışımı tasarlanmıştır.

3- RSM ile yapılan optimizasyon sonucunda belirlenen yakıt karışımına ait motor performansı ve egzoz emisyon çıktıları ile gerçek deney sonuçlarını karşılaştırmak için deney yakıtı hazırlanarak doğrulama deneyleri yapılmıştır. Optimizasyon sonucu elde edilen çıktılar ile doğrulama deneyinden elde edilen çıktıların çok iyi seviyede benzerlik gösterdiği tespit edilmiştir. Doğrulama deneyi yapılan yakıt karışımının yakıt özellikleri incelenmiş ve soğuk akış özelliklerinin çok iyi seviyede, bununla birlikte motor performans değerlerinin kabul edilebilir ve egzoz emisyon değerlerinin de emisyon standartlarına uygun olduğu belirlenmiştir.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Literatür araştırması dört başlık altında incelenmiştir. Bunlar; “Dizel Yakıtı ile Bitkisel Yağ Karışımı”, “Dizel Yakıtı ile Alkol Karışımı”, “Dizel Yakıtı ile Üçlü Karışım” ve “Deney Tasarımı” olarak sıralanmıştır.

Literatürde yer alan çalışmalarda dizel yakıtı ile bitkisel yağlar veya alkoller karışım oluşturma yöntemiyle çeşitli oranlarda karıştırılmış ve bu karışım yakıtlarının dizel motordaki motor performansı ve egzoz emisyonları incelenmiştir. Yapılan çalışmalar bu yönüyle tezin konusu ile yakınlık göstermektedir. Ancak literatürdeki yapılan çalışmalar euro dizel yakıtı, bitkisel yağ ikili karışımına üçüncü bileşen olarak alkolün karıştırılması, bileşenlerin soğuk akış özelliklerine göre üçlü karışımların düşük sıcaklıklardaki çözünürlük ilişkilerinin incelenmesi, yanıt yüzey yöntemi kullanılarak motor performansı ve egzoz emisyon parametrelerine göre optimum karışım oranının belirlenmesi açısından değerlendirildiğinde, tez konusunun farklılığı ortaya çıkmaktadır. Ayrıca, tez çalışmasında hedeflenen yanıt yüzey yöntemi kullanılarak optimum üçlü yakıt karışımı tasarlama konusu kapsamında literatürde herhangi bir çalışmaya rastlanmamıştır.

2.1 Dizel Yakıtı ile Bitkisel Yağ Karışımı

Fontaras ve diğ. [22] ham bitkisel yağ ile dizel yakıtı karışımlarının, şasi dinamometresinde ve Artemis sürüş çevrimine göre gerçek yol şartlarında, euro-3 normuna uygun common-rail yakıt sistemine sahip renault laguna binek otomobilinde yakıt tüketimi ile yasal emisyon düzenlemelerinde yer alan emisyonları ve yer almayan karbonil bileşiklerini (aldehitler ve ketonlar) incelemiştir. Yapılan çalışmada ham pamuk, ayçiçek ve kolza yağı ayrı, ayrı %10 karışım oranında dizel yakıtı ile karıştırılmıştır. Karışımların yakıt özellikleri analiz edilmiş ve standartlara uygun olduğu belirtilmiştir.

Deney sonuçlarına göre, tüm karışımların araç performansı ve egzoz emisyonlarına çok az etkide bulunduğu belirtilmiştir. Yasal düzenlemelerde yer alan karbondioksit (CO₂), karbonmonoksit (CO) ve hidrokarbon (HC) emisyonlarında

sırasıyla %3, %39 ve %31 oranında artış gözlenmiştir. Özellikle ayçiçek yağı karışımında partikül madde (PM) emisyonunda azalma kaydedilirken azot oksit (NO_x) emisyonu aynı seviyede kalmıştır. Kolza yağının karbonil bileşikleri arasında yüksek oranda aseton tespit edilmiştir. Dizel yakıtı ile benzer yakıt özelliklerine sahip olan ham yağların, dizel motoru emisyonlarında önemli bir etki yapmaksızın karışım oluşturma yoluyla kullanılabilmesi belirtilmiştir. Ayrıca, çevresel ve enerji güvenliği gibi faktörlerden dolayı ulaşım sektöründe biyoyakıt uygulamalarının desteklenmesi gerektiğini vurgulamışlardır. Dizel motorların icadından beri ham bitkisel yağların dizel motorları için alternatif yakıt olarak görüldüğü ve bu yağların Avrupa'daki biyoyakıt ekonomisindeki payının %4 olduğu belirtilerek, biyodizel üretim maliyetinin yüksek olmasının gelişmekte olan ülkelerde ham yağ kullanım oranını artırabileceği vurgulanmıştır.

Altın ve diğ. [24] bitkisel yağların dizel motorlar için yakıt olarak kullanma potansiyelini araştırmışlardır. Türkiye'de en çok üretilen bitkisel yağların ayçiçek ve pamuk yağı olduğu belirtilmiştir. Çalışmada saf ayçiçek, pamuk, soya yağı ve onların metil esterleri ile rafine edilmiş mısır, kolza yağı ve damıtılmış haşhaş yağı metil esterleri olmak üzere toplam dokuz test yakıtı kullanılmıştır ve yakıt özellikleri analiz edilmiştir. Bitkisel yağ karışımlarının yüksek viskozitelerini azaltmak amacıyla elektrikli ısıtıcı yardımıyla 80 °C'ye kadar ön ısıtma uygulanmıştır. Deneyler elektrikli dinamometrede, tek silindirli, direkt püskürtmeli, su soğutmalı superstar 7710 motorunda gerçekleştirilmiştir.

Deney sonuçlarına göre, bitkisel yağ kullanımında dizel yakıtına göre çok az bir miktar güç kaybı gözlenmiştir. Dizel yakıtına göre PM emisyonunda artış ancak azot dioksit (NO_2) emisyonunda azalma kaydedilmiştir. Bitkisel yağ metil esterlerinin gösterdiği motor performansı ve emisyonlar dizel yakıtına yakın olduğundan dolayı bu yakıtların dizel yakıtı yerine kullanılabilmesi belirtilmiştir. Saf bitkisel yağların ise kullanılmadan önce yüksek viskozitelerinin azaltılması gerektiği belirtilmiştir. Bitkisel yağların dizel yakıtına göre fiyatlarının yüksek olması, yıllık üretilen miktarının istikrarlı olmaması gibi dezavantajları ve düşük enerji içeriğine bağlı olarak yüksek yakıt tüketimlerinden dolayı üretilen miktarın artırılması ve bu yolla fiyatlarının düşürülmesi gerektiği belirtilmiştir.

Esteban ve diğ. [25] yaptıkları çalışmada, biyodizel yakıtına dönüştürmek yerine bitkisel yağı doğrudan biyoyakıt gibi kullanmak çevre açısından faydalı mı? sorusuna cevap aramışlardır. Dünya genelinde artan petrol fiyatları ve fosil kökenli yakıtların yaydığı emisyonlar ile oluşan sera gazı etkisinin artmasından dolayı yeni ve alternatif enerjilere yönelmenin zorunlu hale geldiği belirtilmiştir. Çalışmada motorlu araçlarda biyodizel ve biyoteanol kullanımının yanı sıra diğer seçeneğin doğrudan bitkisel yağların kullanılması ekonomik ve çevresel faktörler yönünden incelenmiştir. Bitkisel yağların üretiminin biyodizele göre daha kolay olması, yan ürün olarak saflaştırılması gereken gliserinin ortaya çıkmaması, küçük çapta üretimlerin yapılabilmesi ve direkt olarak dizel motorlu araçlarda kullanabilmesi bitkisel yağların avantajı olarak görülmüştür. Araştırma sürecinde İspanya'da yetişen kolza tohumundan elde edilen kolza yağı ve kolza yağı metil esteri kullanılarak, 335 kW gücünde, 14,5 ton ağırlığında, %85 yüklü durumda olan bir ağır yük taşıyan kamyonu 1 km hareket ettirmek suretiyle emisyon testleri yapılmıştır.

Test sonuçlarına göre, her iki yakıtında yaydığı emisyonların aynı olduğu ancak biyodizelin üretim aşamasında büyük ölçekli işlemlerin olması ve yatırım geri dönüşünün bitkisel yağa göre düşük olması dezavantaj olarak belirtilmiştir. Bitkisel yağında büyük ölçekli üretimlerinde de aynı problemlerin olacağı ancak küçük ölçekli üretilen yağın direkt olarak kullanılabilmesi bununda çevre açısından yararlı olacağı savunulmuştur.

Franco ve Nguyen [26] bitkisel yağ ile dizel yakıtı karışımlarının akışkanlık özelliklerini incelemişlerdir. Çalışmada bitkisel yağların her yerde yetişebilen ve birçok yağlı tohumdan üretilmesi, CO₂ çevrimi, ihmal edilebilir düzeyde kükürt di oksit (SO₂) emisyonu, yüksek parlama noktası sayesinde kolayca depolanabilmesi, direkt kullanımında temiz yanma ve dizel motorlar için alternatif bir enerji kaynağı olmasının olumlu ancak viskozitelerinin yüksek olmasının dizel motorlar için olumsuz bir etki yarattığı belirtilmiştir. Bitkisel yağların alternatif bir yakıt olarak dizel yakıtının yerine kullanılması çeşitli oranlarda dizel yakıtı ile karıştırılması veya ön ısıtma yapılması ile mümkün olabileceği belirtilmiştir. Bu kullanımda en büyük problemin yüksek viskozitenin yol açtığı yakıt atomizasyonunun düşük olması ve yakıtın yanma odasında hava ile iyi karışmaması olarak sıralanmıştır. Ayrıca, buna bağlı olarak enjektör damlaması ve yanma odasında karbon birikintileri de ilave

olumsuzluklar olarak açıklanmıştır. Bu durumda bitkisel yağların dizel yakıtı yerine kullanılabilmesi için akış özelliklerinin iyi ayarlanması gerektiği belirtilmiştir. Yapılan çalışmada altı farklı özellikteki yenebilir bitkisel yağın (kanola, mısır, zeytin, yerfıstığı, soya ve ayçiçek) dizel yakıtı ile hacimsel olarak %20, %40, %60 ve %80 oranlarında oda sıcaklığında karıştırıcı ile karıştırılarak test yakıtları elde edilmiştir. Ham ve karışım oluşturulan yakıtların akışkanlık özellikleri sabit sıcaklıkta 20 °C ile 80 °C arasında ölçülmüştür. Testlerde yakıtların asit bileşenleri ile birlikte dinamik ve kinematik viskoziteleri ölçümleri ile yakıtların sıcaklıkları ve karışım bileşenlerinin özellikleri tespit edilmiştir. Elde edilen verilerle hesaplamalar yapılarak karışımın viskozitesinden sıcaklığı ve yağ konsantrasyonu belirlenmiştir. Buna uygun bir model geliştirilmiş ve bu model sayesinde dizel yakıtı ile bitkisel yağ karışımlarının dinamik ve kinematik viskozitesinin tahmin edilebileceğini savunmuşlardır.

Hazar ve Aydın [27] ön ısıtma yapılmış saf kolza yağı ile dizel yakıtı karışımı ile çalışan bir dizel motorunun performans ve emisyonunu değerlendirmişlerdir. Çalışmada saf kolza yağı ve dizel yakıtı karışımı olarak %50 dizel yakıtı ile %50 kolza yağı ve %80 dizel yakıtı ile %20 kolza yağı karışımı kullanılmıştır. Hazırlanan yakıtlar tek silindirli 4 zamanlı direkt püskürtmeli rainbow-186 dizel motorunda test edilmiştir. Deneylede ayrıca 100 °C'ye kadar ısıtılan dizel yakıtı ve kolza yağı karışımının motor performansına etkileri ve emisyonları araştırılmıştır. Saf kolza yağı karışımının 100 °C'ye kadar ısıtılmasının düşük viskozitenin sağlanması ile düzgün akış ve filtre tıkanmasının önlenmesi yönünden gerekli olduğu savunulmuştur.

Deneyle sonucunda ön ısıtma işlemi ile yakıt pompası ve enjektörlerde meydana gelen sızıntılar nedeniyle motor gücünde dizel yakıtına göre düşüş gözlenmiştir. Kolza yağının %50 oranında olduğu karışımda özgül yakıt tüketiminde azalma görülmüştür. Ancak tüm test sonuçlarına göre, saf kolza yağının ısı değeri dizel yakıtına göre oldukça düşük olması nedeniyle kütleli yakıt tüketiminde artış kaydedilmiştir. Egzoz gazı sıcaklığında azalma olmamış ve %50'lik karışımın egzoz sıcaklığının %20'lik karışıma göre daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Karışımların NO_x emisyonlarında dizel yakıtına göre daha düşük değer elde edilmiştir. Ancak ön ısıtma gerçekleştirilen karışımların NO_x emisyonunda artış kaydedilmiştir. CO

emisyonunda ise ön ısıtma ile çok iyi yakıt hava karışımının sağlanması ve geliştirilen püskürtme özelliği sayesinde azalmanın gerçekleştiği belirtilmiştir.

Altun ve Gür [28] yaptıkları çalışmada, bitkisel yağların alternatif yakıt olarak dizel motorlarda kullanılmasını genel olarak incelemişlerdir. Yapılan incelemeye göre, bitkisel yağların dizel motorlarında yakıt olarak kullanılabilceği vurgulanmıştır. Ancak, motorin ile çalışmaya göre tasarlanmış mevcut dizel motorlarda bitkisel yağların doğrudan yakıt olarak kullanılması sırasında bitkisel yağların bazı yakıt özelliklerinden dolayı problemler ortaya çıktığı ve bu nedenle bitkisel yağların yakıt özelliklerinin iyileştirilmesi gerektiği belirtilmiştir.

Rakopoulos [33] yaptığı çalışmada, pamuk yağı ve ayçiçek yağı ile bu yağlardan elde edilen metil esterlerini dizel yakıtıyla %10 ve %20 karışım oranlarında karıştırarak altı silindirli, turboşarjlı mercedes marka dizel motorunda hiçbir modifikasyon yapmadan, deney motorunun maksimum moment devri olan 1500 d/dk.'da %20, %40, %60 ve %100 yüklerdeki ısı salımını ve egzoz emisyonlarını analiz etmiştir. Yapılan deneysel çalışma sonuçları dizel yakıtı ile karşılaştırılmıştır.

Deney sonuçlarına göre, yakıt enjeksiyon basınç diyagramında çok fark görülmemiştir. Tutuşma gecikmesinin aynı seviyede olduğu, maksimum silindir basıncında ve silindir içi sıcaklıklarda ise azalma kaydedilmiştir. Duman koyuluğunda biyoyakıt karışım oranı arttıkça azalma gerçekleşmiştir. Ayrıca, pamuk yağı ve biyodizelinin duman emisyonunun ayçiçek yağı ve biyodizeline göre daha düşük değerde olduğu kaydedilmiştir. NO_x emisyonunda ise biyoyakıt karışım oranı arttıkça her iki yağ türünde de artış gözlenmiştir. Çalışmada biyodizelin dizel yakıtına benzer yakıt özelliklerine sahip olmasına rağmen düşük oksidasyon kararlılığına sahip olması ve düşük sıcaklıklarda da su tutma gibi olumsuz özelliklerinin bulunduğu belirtilmiştir.

Fontaras ve diğ. [53] yaptıkları bir çalışmada, otomobil dizel motorları için yakıt olarak dizel yakıtı ile pamuk yağı karışımının kullanılmasını incelemişlerdir. Yapılan çalışmada %10 pamuk yağı içeren dizel yakıtı karışımı hazırlanarak, yakıt özellikleri analiz edilmiştir. Karışımın EN590 yakıt standartlarını sağladığı ve setan sayısı, viskozitesi, yoğunluğu, alev alma noktası değerinin kabul edilebilir seviyede

olduğu ayrıca soğuk akış özelliklerinin dizel yakıtına yakın olduğu belirtilmiştir. Deneý yakıtı euro-3 normuna uygun common-rail yakıt sistemine sahip renault laguna binek otomobilinde 0 km'den başlayarak öncelikle 2000 km daha sonra 4000 km, 6000 km, 12000 km ve 14000 km'ye kadar şehir içinde, düz yolda ve yüksek hızda otobanda olmak üzere 3 değişik şartta test edilmiştir. Deneyler sırasında CO, HC, NO_x ve PM emisyon ölçümü yapılmıştır. Daha sonra araç řasi dinamometresine bağlanarak dördüncü viteste gaz kelebeği tam açık konumda saatte 60 km hızdan 110 km'ye kadar hızlandırılarak ölçümler yapılmıştır.

Deneý sonuçlarına göre, pamuk yağı ile dizel yakıtı karışımının bazı şartlar altında dizel motor yakıtı olarak kullanılabilceği belirtilmiştir. CO₂ emisyonunda artış ve azalış yönünde dalgalanmalar kaydedilmiş ve testlerin bu emisyonu göre yapılması tavsiye edilmiştir. Diđer kirletici emisyonlar için pamuk yağı ile dizel yakıtı karışımı kullanımında dizel yakıtına göre olumsuz etki olmadığı ancak euro normuna göre yüksek olduğu belirtilmiştir. NO_x emisyonunda ise çok az bir artış kaydedilmiştir. Partikül boyutunda ve sayısında pamuk yağı olumlu etki göstermiştir. Hızlanma testlerinde motor gücü ve momentunda olumsuz etki gözlenmemiştir. Bundan sonraki yapılacak çalışmalarda pamuk yağı kullanımının motor çalışma parametreleri üzerindeki etkilerinin incelenmesinin yararlı olacağı belirtilmiştir.

Yücel [55] tarafından yapılan bir çalışmada, pamuk yağının alternatif dizel yakıtı olarak kullanılması incelenmiştir. Saf haldeki pamuk yağı hacimsel olarak %10 ile %90 arasında dizel yakıtı ile karıştırılarak test yakıtları hazırlanmıştır ve yakıt analizleri yapılmıştır. Yakıt analizi sonuçlarına göre pamuk yağının, ısıl değerinin dizel yakıtına göre daha düşük olduğu, viskozitesinin çok yüksek olduğu ve daha düşük sıcaklıkta katılaşma eğilimi gösterdiği belirtilmiştir. Deneyler tek silindirli dizel motorunda gerçekleştirilmiştir. Karışımların dizel motorlarında alternatif yakıt olarak kullanılması halinde, motor elemanları üzerinde ne gibi etkilerinin olduğunu tespit etmek, karışımlarının kısa ve uzun süreli çalışmalar için kullanılabilir olup olmadığının belirlenmesi ve en uygun karışım oranını belirleyebilmek için 100 saatlik çalışma süresince test edilmiştir.

Deneý sonuçlarına göre, motor gücünün yaklaşık aynı kaldığı özgül yakıt tüketiminin ise arttığı belirtmiştir. CO ve HC emisyonlarında dizel yakıtına göre artış, NO_x emisyonunda ise düşüş olduğu kaydedilmiştir. Dizel motorlarda herhangi

bir değişikliğe gidilmeden pamuk yağı ile dizel yakıtı karışımlarının alternatif yakıt olarak kullanılabilirliğinin daha çok düşük karışım oranlarında olabileceği ve uzun süreli çalışmalar için pamuk yağı karışım oranının %40'ı geçmemesi gerektiği vurgulanmıştır.

Martin ve diğ. [56] ise pamuk yağının dizel motoru için yakıt olarak kullanılmasında yakıt performansını artırmak için kullanılan farklı yöntemleri karşılaştırmışlardır. Bunlar, pamuk yağının transesterifikasyon yapılması, dizel yakıtı ile karışımının ön ısıtma yapılması, portakal yağı ve dietileter ile karıştırılması olarak sıralanmıştır. Deneysel çalışma tek silindirli, dört zamanlı, su soğutmalı, 5,2 kW gücündeki kirloskav motorunda dört aşamada gerçekleşmiştir. Birinci aşamada pamuk yağı etil esteri test edilmiştir. İkinci aşamada pamuk yağı %20, %40, %60, %80 ve %100 karışım oranlarında dizel yakıtı ile karıştırılarak ön ısıtmalı (oda sıcaklığından itibaren 10 °C artırılarak 110 °C'ye kadar ısıtma yapılmış) ve ön ısıtma olmadan test edilmiştir. Üçüncü aşamada %5, %10 ve %15 karışım oranlarındaki portakal yağı ile pamuk yağı karıştırılarak test yapılmıştır. Dördüncü aşamada ise %10, %20 ve %30 karışım oranlarındaki dietileter ile pamuk yağı karıştırılarak test yapılmıştır.

Deney sonuçlarına göre, deney motorunda tek yakıt olarak pamuk yağının kullanılması durumunda yüksek viskoziteden dolayı yanma kötüleştiğinden ısı veriminde düşüş kaydedilmiştir. Pamuk yağı etil esteri kullanımında ise ısı veriminde %28 ile %30 arasında artış kaydedilmiştir. Ancak, bu yakıtın üretilmesi aşamasında ortaya çıkan yan ürünlerin motorda kullanılmadığı belirtilmiştir. %60 pamuk yağı ile %40 dizel yakıtı karışımında iyi ısı verim ve duman seviyesinde önemli bir azalma gerçekleşmiştir. %85 pamuk yağı ile %15 portakal yağı karışımında yüksek yanma oranı ve hızlı ısı salımına sahip ileri alev yayılımı sayesinde ısı verim %30,5 olarak elde edilmiştir. Portakal yağı ile pamuk yağı karışımında viskozite ve yoğunluk azalmış uçuculuk artmıştır. Dietileterin setan sayısı ve uçuculuğu yüksek olduğundan pamuk yağı karışımında tutuşma gecikme süresinin azaldığı kaydedilmiştir. Isı değeri yüksek portakal yağı ve dietileter ilavesinde motor performansında artış gözlenmiştir. Çalışma sonucuna göre pamuk yağı ve pamuk yağı etil esteri motorda herhangi bir modifikasyon yapmadan kullanıldığı kaydedilmiştir. Ancak pamuk yağının ön ısıtma veya dizel yakıtı ile karışım oluşturarak kullanılmasında

viskozitenin azaltılması ve motor performansının artırılmasında etkili olduğu vurgulanmıştır. Portakal yağı ve dietilelerin küçük miktarlarda pamuk yağına ilave edilmesi de dizel motorun performansını artıran diğer bir etkili yöntem olarak gösterilmiştir.

Mbarawa [59] yaptığı çalışmada, bir dizel motorunda karanfil yağı ve dizel yakıtı karışımlarının motor performansına ve egzoz emisyonlarına etkilerini araştırmıştır. Deneysel dört silindri direkt püskürtmeli Isuzu motorunda gerçekleştirilmiştir. Saf yağın ve test yakıtının analizi yapılmıştır. Çalışmada %25 karanfil yağı ile %75 dizel yakıtı ve eşit oranlarındaki yakıt karışımlarının motorda herhangi bir modifikasyon ve ayar yapmaksızın 20° püskürtme avansında ve sırasıyla 1000, 1500 ve 2000 d/dk.'da oluşturduğu, ısı verim, özgül yakıt tüketimi, egzoz gazı sıcaklığı ve emisyonları araştırılmıştır. Deneysel sonuçunda ısı verim ve özgül yakıt tüketiminin dizel yakıtına göre daha yüksek olduğu ortaya çıkmıştır. Egzoz gazı sıcaklığı sadece normal hız koşullarında tüm karışımlarda aynı değerde bulunmuştur. Test yakıtının oluşturduğu HC emisyonu dizel yakıtından düşük iken %25 karışım oranında CO emisyonu ve %50 karışım oranında NO_x emisyonunda artış olduğu gözlemlenmiştir.

Radu ve Mircea [60] tarafından yapılan çalışmada, dizel motorlarında ayçiçek yağının kullanımı incelenmiştir. Bitkisel yağların, yenilenebilir olması, düşük oranda sülfür içermesi, güvenli depolanabilmesi ve sağlık açısından risk taşımamasından dolayı alternatif dizel yakıtı olarak kullanılabilmesi fakat direkt püskürtmeli motorlarda düşük ısı verim ve yüksek viskozitelerinin problem olabileceği belirtilmiştir. Deneysel çalışmada direkt püskürtmeli, üç silindri bir dizel motoru kullanılmıştır. Sedimente edilmiş ayçiçek yağı, yağ asitleri alınmış ayçiçek yağı ve ham ayçiçek yağı ile bu üç yağın dizel yakıtıyla karıştırılması sonucu altı ayrı yakıt elde edilmiş ve bu yakıtlar deney motorunda test edilmiştir. Motor deneyleri %20, %40 ve tam yükte yapılmıştır. Deney sonuçlarına göre, yağ ve yağ ile dizel yakıtı karışımlarının düşük yanma ısı ve yüksek viskoziteye sahip olduğu, karışımların ham olarak kullanılan yağlara göre güç, moment ve yakıt tüketimi açısından daha iyi olduğu belirlenmiştir.

Rakopoulos ve diğ. [61] arkadaşları, değişik türlerdeki bitkisel yağ ve biyodizelin dizel yakıtı ile karışımının direkt püskürtmeli bir dizel motorunda kullanılmasını performans ve emisyon yönünden karşılaştırmışlardır. Çalışmada palmiye, pamuk, soya, ayçiçek, mısır ve zeytin çekirdeği yağı ile pamuk yağı metilesteri (ME), soya yağı ME, ayçiçek yağı ME, kolza yağı ME ve palmiye yağı ME kullanılmıştır. Test yakıtları dizel yakıtına %10 ve %20 oranlarında ayrı ayrı karıştırılarak hazırlanmıştır. Her bir yakıt karışımı için yapılan deneyler elektrikli dinamometrede, tek silindirli, su soğutmalı, direkt püskürtmeli ricardo marka dizel motorunda 2000 d/dk.'da 29° püskürtme avansında, %38 (orta) ve %75 (yüksek) yük oranlarında, 250 bar püskürtme basıncında gerçekleştirilmiştir.

Deney sonuçlarına göre, çeşitli biyodizel ve bitkisel yağ karışımlarının motor performansının dizel yakıtı ile aynı olduğu yaklaşık olarak aynı ısıl verime sahip oldukları ve özgül yakıt tüketiminde yüksek yüklerde artış, %10'luk karışımın düşük yüklerinde ise azalma kaydedilmiştir. Duman koyuluğunun biyodizel karışımlarında karışım oranı arttıkça azaldığı ancak bitkisel yağ karışımlarında karışım oranı arttıkça bu oranın da arttığı belirtilmiştir. Biyodizel ve bitkisel yağ karışımlarının oluşturduğu NO_x emisyonunda az bir düşüş gerçekleşmiş ve bu azalmanın karışım oranı arttıkça daha da azaldığı belirtilmiştir. CO emisyonunda biyodizel karışımlarında karışım oranına bağlı olarak azalma gerçekleşmiştir. Bitkisel yağ karışımlarında ise karışım oranı arttıkça emisyon değeri de artmıştır. Ancak, bitkisel yağların oluşturduğu CO emisyon değerinin düşük olduğu değerlendirilmiştir. HC emisyon seviyesinin biyodizel ve bitkisel yağ karışımları için önemli bir artış ve azalış göstermediği ve emisyon seviyelerinin çok düşük olduğu değerlendirilmiştir. Biyodizel ve bitkisel yağların dizel yakıtı ile düşük karışım oranlarında karıştırılarak dizel motorlarında güvenli ve yararlı bir şekilde kullanılabileceği vurgulanmıştır.

Mani ve diğ. [62] atık plastikten elde edilen yağ ile dizel yakıtı karışımlarının dizel motorunda kullanılmasını incelemiştir. Çalışmada çevreyi kirleten plastik poşet, şişe ve atık plastiklerden elde edilen yağın özellikleri analiz edilmiş ve dizel yakıtı ile benzer özellikler gösterdiği vurgulanmıştır. Deney yakıtı olarak %100 plastik yağı ve plastik yağ %10, %30, %50 ve %70 oranlarında dizel yakıtı ile karışımı kullanılmıştır. Bu karışımların dizel yakıtına göre motor performans karakteristikleri karşılaştırılmıştır. Deney sonuçlarına göre, egzoz emisyonu

bakımından NO_x emisyonu %25, CO emisyonu %5, HC emisyonu %15 ve duman emisyonu tam yük durumunda %40 artış göstermiştir. Belirtilen oranlarda yakıt karışımlarının kullanılması ile krank açısı esas alınarak belirlenen tutuşma gecikmesinin artmasından dolayı silindir basınç seviyesi dizel yakıtında tam yükte 67 bar iken %100 atık plastik yağı kullanımında ise 72 bar olarak gözlenmiştir. Tam yük durumunda ısı verim %80 artış göstermiş ve egzoz gazı sıcaklığında tüm yük koşullarında dizel yakıtına göre artış kaydedilmiştir. Çalışma sonucunda atık plastiklerden elde edilen yağın doğrudan dizel motorlarda yakıt olarak kullanılabilmesi belirtilmiştir.

Labeckas ve Slavinskas [63] Estonya’da üretilen bölgesel bir yağ olan shale yağının direkt püskürtmeli dizel motorundaki performans ve emisyon karakteristiklerini incelemişlerdir. Deney sonuçlarına göre, dizel motoru shale yağı ile tam yükte çalıştırıldığında, maksimum moment değerindeki özgül yakıt tüketiminin %12,3 ve güç oranının ise %20,4 arttığı tespit edilmiştir. Isıl verim açısından her iki yakıt arasındaki farkın çok fazla olmadığı değerlendirilmiştir. Motor kısmi yükte çalıştırıldığında, shale yağının meydana getirdiği toplam NO_x miktarının oldukça düşük olduğu fakat motor maksimum moment ve güç oranında çalıştırıldığında ise NO_x oranının %21,8’den %27,6’ya yükseldiği tespit edilmiştir. Motor tam yükte shale yağı ile çalıştırıldığında, duman koyuluğu %30-35 oranında azaldığı tespit edilmiştir. Egzoz gazındaki HC konsantrasyonu 10 ile 25 ppm arasında ölçülmüş ve bu değerler motor yüküne, hızına veya kullanılan yakıtı bağlı olarak çok değişmediği belirtilmiştir.

Wang ve diğ. [64] bitkisel yağ karışımı kullanılan bir dizel motorunun performans ve egzoz emisyonlarını deneysel olarak incelemişlerdir. Çalışmada dünya üzerinde bitkisel yağlar ile ilgili yapılan araştırmaların sonuçlarına göre yağların yakıt özelliklerinin iyileştirilmesi ile dizel motorlarda dizel yakıtı yerine kullanılabilmesi sonucuna vurgu yapılmıştır. Deney aşamasında ismi verilmeyen bir bitkisel yağ %100 ve dizel yakıtı ile %25, %50, %75 oranlarında karıştırılarak deney yakıtları hazırlanmıştır. Deneyler iki silindirli, lister-petter marka hava soğutmalı dizel motorunda sırasıyla %25, %50, %75 ve %100 yük konumunda her bir yakıtta test sonuçlarının güvenilirliği için altı kez tekrarlanarak yapılmıştır.

Deney sonuçlarına göre, bitkisel yağ ve karışımlarının motor çıkış gücü ve yakıt tüketiminin neredeyse dizel yakıtı ile aynı olduğu gözlenmiştir. Bitkisel yağ ve karışımlarının NO_x emisyonu dizel yakıtına göre düşük çıkmıştır. Özellikle %100 bitkisel yağ ve karışımlarının kullanımında bitkisel yağın alt ısıl değerinin düşük olması bu durumun nedeni olarak gösterilmiş ve yakın gelecekte bitkisel yağların dizel yakıtı yerine kullanılmasında bu hususun önemli olacağı belirtilmiştir. CO emisyonu dizel yakıtına göre düşük bulunmuştur. Ancak düşük yüklerde CO emisyonu %0,065 yükselmiştir. HC emisyonu dizel yakıtına göre düşük bulunmuştur ve %50 karışım oranında HC emisyonu çok az yükseldiği gözlenmiştir. CO₂ emisyonu ise dizel yakıtına göre düşük çıkmıştır.

Misra ve Murthy [65] yenilmeyen soapnut (*sapindus mukorossi*) yağı ile dizel yakıtı karışımını motor performansı, emisyon ve yanma karakteristikleri bakımından incelemişlerdir. Bitkisel yağların karışımlarının dizel motorlarında herhangi bir modifikasyon yapmadan kullanılabilmesi literatüre dayandırılarak açıklanmıştır. Ancak bitkisel yağların dizel motorlarında kullanımında yaşanan problemlerin nedeni olarak yüksek viskoziteye sahip olması gösterilmiştir. Çalışmada soapnut yağı (SNO) dizel yakıtı ile %10, %20, %30 ve %40 oranlarında karıştırılarak deney yakıtları hazırlanmıştır. Deneyler tek silindirli, su soğutmalı dizel motorunda 1500 d/dk.'da her bir karışım için 30 dk. süreyle çalıştırılarak sırasıyla %25, %50, %75 ve %100 yük oranlarında yapılmıştır.

Deney sonuçlarına göre, düşük karışım oranı olarak SNO10 karışımı %75 yükte kullanıldığında ısıl verimde çok az bir azalma gözlenmiştir. Bunun sebebi olarak yüksek viskozitenin püskürtme özelliğini etkilemesi ve düşük buharlaşma ısısı olarak gösterilmiştir. Özgül enerji tüketiminde %4 ile %8 arasında artış gözlenmiştir. Bunun sebebi olarak, yağın düşük ısıl değere ve yüksek yoğunluğa sahip olması gösterilmiştir. Motor gücü ve yakıt tüketimi SNO10 karışımında dizel yakıtına benzer oranda çıkmıştır. CO emisyonu dizel yakıtına göre, SNO10 ve SNO20 karışımlarında düşük çıkmış ancak karışım oranı arttıkça CO emisyonunun arttığı gözlenmiştir. HC emisyonu dizel yakıtına göre SNO karışım oranı arttıkça artış göstermiştir. Özellikle %75 yük oranında tüm karışımlarda HC emisyonunda artış olmuştur. Bunun sebebi olarak yüksek viskozite, düşük yakıt atomizasyonu olarak gösterilmiştir. Karışımlar arasında SNO10 karışımında HC emisyonunda azalma

kaydedilmiştir. Motor yükü arttıkça silindir içi sıcaklığının ve basıncının artması ile birlikte NO_x oluşumu artmış ancak karışım oranı arttıkça NO_x emisyonu dizel yakıtına göre azalmıştır. Bu azalma SNO10 karışımında %35 olarak kaydedilmiştir. Karışım oranını artırmak diğer emisyon oluşumları için olumsuz etki yarattığından sınırlandırılması tavsiye edilmiştir. PM emisyonu dizel yakıtına göre düşük çıkmıştır. SNO10 karışımında en iyi sonuç alınmıştır. Buna göre karışım yakıtları arasında SNO10 karışımının dizel yakıtının yerine kullanılabileceği değerlendirilmiştir

Agarwal ve Rajamanoharan [66] tarımsal amaçlı kullanılan tek silindirli bir dizel motorunda karanja yağı ve karışımları kullanımının motor performansı ve emisyonuna etkilerini incelemişlerdir. Bitkisel yağların viskozitesini düşürme yöntemleri olarak ısıtma, dizel yakıtı ile karıştırma ve transesterifikasyon yöntemi gösterilmiştir. Transesterifikasyon yönteminin işlem sürecinden dolayı pahalı olduğu belirtilmiştir. Çalışmada bitkisel yağların %100 oranında dizel yakıtı yerine kullanılması yerine viskozitesini azaltmak maksadıyla dizel yakıtı ile karışımı veya ön ısıtma yapılması tavsiye edilmiştir. Yapılan çalışmada yenmeyen türden olan karanja yağı %10 (K10), %20 (K20), %50 (K50) ve %75 (K75) oranlarında dizel yakıtı ile karıştırılarak deney yakıtları hazırlanmış ve yakıt özellikleri analiz edilmiştir. Motor performansı ve egzoz emisyonunun yanı sıra çıkan egzoz gazı ısısı ile ön ısıtma yapılan karanja yağının viskozitesine olan etkileri araştırılmıştır. Ön ısıtma ve ön ısıtmasız olarak bütün karışımlar test edilmiştir. Deneyler su soğutmalı, direkt püskürtmeli, tarımsal alanlarda kullanılan kirloskar AV-1 motorunda herhangi bir modifikasyon yapmadan %20, %40, %60 %80 ve %100 yük oranlarında 1500 d/dk.'da test edilmiştir.

Deney sonuçlarına göre, ön ısıtmalı karışım kullanıldığında motor veriminde biraz artış kaydedilmiştir. Isıl verim ön ısıtma yapılan karışımlar için %30, ön ısıtma yapılmayan K10, K20 ve K50 karışımlarında %24 ile %27 arasında ölçülmüştür. Özgül yakıt ve enerji tüketiminde ön ısıtma yapılan düşük karışım oranlarında iyileşme kaydedilmiştir. Ön ısıtma yapılmayan K50 karışım oranında iyileşme kaydedilmiştir. Duman koyuluğunun ön ısıtma yapılan karışımlarda düşük olduğu ve ön ısıtma yapılmayanlarda ise dizel yakıtına benzer çıktığı görülmüştür. CO emisyonunda %20'ye kadar olan karışımlarda azalma kaydedilmiştir. HC emisyonunda düşük motor yüklerinde azalma, yüksek motor yüklerinde artış

kaydedilmiştir. Bunun sebebi olarak yüksek yüklerde daha fazla yakıtın püskürtülmesi gösterilmektedir. Karanja yağı ve karışımları ön ısıtmalı ve ön ısıtmasız olarak kullanıldığında tüm motor yüklerinde NO_x emisyonunda azalma gözlenmiştir. Sonuç olarak %50'ye kadar olan karanja yağı ve karışımlarında ön ısıtmalı ve ön ısıtmasız olarak dizel motorunda kullanıldığında motor performansını artırdığı egzoz emisyonlarını düşürdüğü için dizel yakıtı yerine kullanılabilceği belirtilmiştir.

Leevijit ve Prateepchaikul [67] yapışkan maddesi giderilmiş, asitten arındırılmış saf palmiye yağı ile dizel yakıtı karışımı kullanımını motor performans ve emisyonları yönünden incelemişlerdir. Palmiye yağının vidalı presleme yöntemiyle kurutulmuş palmiyeden kolayca üretilebildiği ancak içeriğinde zerk ve yağ asitlerinin bulunduğu belirtilmiştir. Bu bileşenlerin yağdan arındırılması için metanol kullanarak esterleme işleminin yapılması ve biyodizel üretilmesinin motor performansı, emisyon ve dayanıklılık açısından iyi olduğu ancak maliyet açısından yüksek olduğu vurgulanmıştır. Bu nedenle yapılan çalışmada palmiye yağı aşama aşama sodyum hidroksil (NaOH) ile reaksiyon işlemine tabi tutularak zerk ve yağ asitlerinden temizlenmiştir. Temizlenen yağın özellikleri dizel yakıtı ile karşılaştırılmıştır. Palmiye yağı hacimsel olarak %20, %30 ve %40 oranlarında dizel yakıtı ile karıştırılarak deney yakıtları hazırlanmıştır. Deneyler dört silindirli, su soğutmalı, ön yanma odalı, turbo beslemeli, toyota motoru kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Deney sonuçlarına göre, yüksek karışım oranlarında özgül yakıt tüketimi %4,3 ile %7,6 arasında artış göstermiş, ısı veriminde %3 ile %5,2 arasında çok az bir düşüş, egzoz gaz sıcaklığında %2,7 ile %3,4 arasında düşüş ve duman koyuluğunda %30 ile %45 arasında önemli bir düşüş, CO emisyonunda %20'lik karışım oranında %70 oranında düşüş ve NO_x emisyonunda tüm karışımlarda çok az bir artış kaydedilmiştir.

Altun ve diğ. [68] susam yağı ile dizel yakıtı karışımının direkt püskürtmeli dizel motorunda kullanımının motor performansı ve egzoz emisyonlarına etkilerini incelemişlerdir. Bitkisel yağların yüksek viskozitesini azaltma yöntemlerinden en ekonomik, kolay ve motor karakteristiği açısından olumlu sonuçlar elde edilebilen yöntem olarak dizel yakıtı ile karışım oluşturma gösterilmiştir. Deney yakıtı olarak

%50 susam yağı ile %50 dizel yakıtı karışımı hazırlanmıştır. Deneyler elektrikli dinamometrede, tek silindirli, hava soğutmalı, direkt püskürtmeli, lombardini 6 LD motorunda gerçekleştirilmiştir. Deneylerde motor çalışma sıcaklığına gelen kadar dizel yakıtı ile çalıştırılmıştır ve 1800 ile 3300 d/dk. aralığında 300 devirlik periyotla artırılarak yapılmıştır. Deney sonuçlarına göre, susam yağı ve dizel yakıtı karışımının motorda herhangi bir modifikasyon yapılmadan kullanılabilmesi, güç değerinin dizel yakıtına yakın değerde, özgül yakıt tüketiminin karışımın düşük ısı değerinden dolayı dizel yakıtına göre yüksek değerde olduğu kaydedilmiştir. CO ve NO_x emisyon değerlerinde dizel yakıtına göre çok az azalma olduğu belirtilmiştir.

Altun ve Öner [69] tarafından yapılan bir çalışmada, %25 susam yağı ve %75 dizel yakıtı karışımı kullanılmıştır. Karışım yakıtında dizel yakıtına göre düşük moment, güç ve özgül yakıt tüketimi elde edilmiştir. NO_x ve CO emisyonlarında ise dizel yakıtına göre daha düşük değerler elde edilmiştir. Egzoz emisyonları dikkate alındığında susam yağı karışımının dizel motorlarında dizel yakıtına alternatif olarak kullanılabilmesi belirtilmiştir. Susam yağının dizel yakıtı ile çeşitli karışım oranlarında karıştırılarak yakıt özelliklerinin ve motor performansının araştırılabilmesi belirtilmiştir.

Shehata ve Razek [70] bir dizel motorunda jojoba yağı ile dizel yakıtı karışımı ve %100 ayçiçek yağı kullanımının motor performansı ve emisyon karakteristiklerine etkilerini araştırmışlardır. Yapılan çalışmada, %100 ayçiçek yağı (S100) ve %20 jojoba yağı ile %80 dizel yakıt karışımından (B20) oluşan deney yakıtları kullanılmıştır. Deneyler tek silindirli, hava soğutmalı, direkt püskürtmeli, deutz motorunda farklı motor yükünde ve egzoz gazı resirkülasyonu (EGR) açılma yüzdelerinde gerçekleştirilmiştir.

Deney sonuçlarına göre, S100 ve B20 yakıtlarında motor gücü, ısı verim ve efektif basınç dizel yakıtına göre düşük çıkmış ancak yüksek motor devirlerinde S100 ve B20 yakıtında silindir basıncı, özgül yakıt tüketimi, silindir cidar sıcaklığı ve egzoz çıkış sıcaklığında artış gözlenmiştir. EGR kullanılmaksızın düşük devirlerde silindir basıncı dizel yakıtında S100 ve B20'ye göre yüksek, yüksek devirlerde ise S100 ve B20 yakıtında silindir basıncı yüksek çıkmıştır. Maksimum silindir basıncının dizel yakıtında, S100 ve B20 yakıtına göre daha önce ulaştığı kaydedilmiştir. CO emisyonu dizel yakıtına göre S100 ve B20 yakıtında yüksek, NO_x

emisyonu ise S100 ve B20 yakıtında düşük çıkmıştır. EGR kullanıldığında tüm yakıt tiplerinde motor gücü, ısı verim ve NO_x azalmış ancak özgül yakıt tüketimi, volümetrik verim, hava yakıt oranı (H/Y) ve CO emisyonu artmıştır. Buna göre EGR kullanılmasının egzoz emisyonunu iyileştirdiği belirtilmiştir. S100 ve B20 yakıtının kısa süreli olarak dizel motorlarında kullanılabilmesi vurgulanmıştır. Devamında yapılacak çalışmalarda değişik motorlarda uzun süreli kullanımlarının araştırılması tavsiye edilmiştir.

Rakopoulos ve diğ. [71] Yunanistan'da en çok üretilen ayçiçek, pamuk, mısır ve zeytinyağları ile dizel yakıtı karışımlarının bir dizel motorundaki motor performansı ve emisyonlarını karşılaştırmışlardır. Bitkisel yağların yüksek viskozitesini azaltmak için kullanılan yöntemler arasında en ekonomik olanın dizel yakıtı ile küçük oranlarda karışım oluşturma yönteminin olduğu vurgulanmıştır. Bu maksatla yapılan çalışmada kullanılan ham bitkisel yağlar %10 ve %20 oranlarında dizel yakıtı ile karıştırılmıştır. Deneyler altı silindirli, turboşarjlı mercedes marka dizel motorunda 1200 ve 1500 d/dk.'da sırasıyla %20, %40 ve %60 yüklerde gerçekleştirilmiştir.

Deney sonuçlarına göre, karışımların özgül yakıt tüketimlerinde ve ısı verimlerinde tüm yüklerde ve devirlerde dizel yakıtının değerlerine yakın değerler elde edilmiştir. Duman emisyonunda ilk sırada zeytinyağı, sonrasında pamuk yağı karışımında en iyi azalma gerçekleşmiştir. Karışım içindeki bitkisel yağ oranı arttıkça CO, HC ve NO_x emisyonlarında çok az artış kaydedilmiştir. Bu artışların nedeni olarak bitkisel yağların yüksek viskoziteye, düşük ısı değere ve düşük setan sayısına sahip olması olarak gösterilmiştir.

2.2 Dizel Yakıtı ile Alkol Karışımı

Sayin ve diğ. [72] dizel motorunda metanol ile dizel yakıtı karışımının motor performansı ve emisyonlarına etkilerini incelemişlerdir. Deney yakıtı olarak %5, %10 ve %15 oranında %99 saflıktaki metanol ile dizel yakıtı karışımları hazırlanmıştır. Deneyler tek silindirli, lombardini 6 LD motorunda püskürtme basıncı ve avansı esas alınarak gerçekleştirilmiştir. Deneyler 180, 200, 220 bar püskürtme basınçlarında, 15°, 20° ve 25° püskürtme avansında 2200 d/dk.'da gerçekleştirilmiştir.

Deney sonuçlarına göre, özgül yakıt tüketimi (BSFC) ve enerji tüketimi artmış (BSEC), düşük ısıl değerden dolayı ısıl verim (BTE) azalmıştır. Dizel yakıtı ile karşılaştırıldığında, karışımdaki metanol oranı arttıkça duman koyuluğu, toplam HC ve CO emisyonu azalmış ancak egzoz gazı sıcaklığı artmıştır. Fabrika enjeksiyon basınç değeri olan 200 bar basıncında en iyi BSFC, BSEC ve BTE elde edilmiştir. Tüm test yakıtlarında püskürtme basıncı ve avansı arttıkça duman koyuluğu CO ve HC emisyonu azalmış ancak NO_x emisyonu artış göstermiştir. Çalışmada yenilenebilir bir yakıt olan metanolün yüksek oktan sayısı ve oksijen içeriği sayesinde benzinli motorlarda çok iyi sonuçlar verdiği vurgulanmıştır. Ancak düşük setan sayısı ve yüksek buharlaşma ısısı nedeniyle dizel motorlarında kullanılmasında çeşitli problemler yaşandığı belirtilmiştir.

Sayın [73] yaptığı diğer bir çalışmada metanol, etanol ile dizel yakıtı karışımlarının motor performansı ve egzoz gazı emisyonuna etkilerini incelemiştir. Dizel motorlar üzerine son yirmi yılda yapılan araştırmalarda esas problemin dizel motor emisyonlarının azaltılması olduğu belirtilerek, emisyonu azaltmak için fosil kökenli yakıtlara alternatif olan biyoyakıtlardan alkollerin önemi vurgulanmıştır. Alkollerin dizel yakıtına göre düşük viskoziteye sahip olmasıyla kolayca püskürtülmesi ve hava ile iyi bir karışım oluşturması, yüksek oksijen içeriği, düşük sülfür oranı sayesinde emisyonların az olması, yüksek alev alma hızı sayesinde ısıl verimin artması genel avantajları, ancak dizel yakıtı ile belirli karışım oranlarında bir süre sonra faz ayrışmasının gerçekleşmesi ise dezavantajı olarak gösterilmiştir. Literatürde yapılan çalışmalarda dizel motorlarında alternatif yakıt olarak kullanılan etanol ve metanol üzerine birçok çalışma yapıldığı ancak bu iki alkolün aynı motordaki performansları ve emisyonlarının karşılaştırılmadığı belirtilerek yapılan çalışmada etanol ile dizel ve metanol ile dizel yakıt karışımları aynı motorda kullanılarak deneyler yapılmıştır. Deney yakıtı olarak euro dizel yakıtı, %99 saflıkta etanol ve metanol kullanılmıştır. Bu yakıtlardan %5 (E5), %10 (E10) etanol ile dizel yakıtı karışımı ve %5 (M5), %10 (M10) metanol ile dizel yakıtı karıştırılarak deney yakıtları hazırlanmıştır. Hazırlanan bu karışımların homojen halde kalmasını sağlamak ve faz ayrışmasını önlemek için karışımlara %1 dodecanol ilave edilmiştir. Deneyler elektrikli dinamometrede tek silindirli, super star 7710 motorunda gerçekleştirilmiştir. Deneyler 200 devirlik periyotlar halinde 1000 ile 1800 d/dk. aralığında yapılmıştır.

Deney sonuçlarına göre, her iki karışımda da is oluşumu, CO ve HC emisyonu azalırken, NO_x emisyonu artış göstermiştir. Özgül yakıt tüketimi düşük ısıl değerden dolayı artmıştır ve bu artış metanol karışımlarında daha fazla kaydedilmiştir. Isıl verimde düşük ısıl değerden dolayı tüm karışımlarda azalma kaydedilmiş ve en düşük ısıl verimin M10 karışımında olduğu belirtilmiştir.

Huang ve diğ. [74] etanol ile dizel karışımlarının dizel motorundaki performans ve emisyonlarını incelemişlerdir. Etanolün çok sayıda yenilenebilir hammaddeden üretilebilen bir yakıt olduğu ancak düşük yoğunluğu ve viskozitesi nedeniyle dizel yakıtı ile homojen olarak karışabilmesi için araştırmaların yapılması gerektiği belirtilmiştir. Etanol ile dizel yakıtı karışımının faz kararlılığının sağlamak amacıyla yapılan çalışmada etanol ile dizel karışımında hacimsel olarak dizel yakıtı miktarına n-bütanol ilave edilerek yakıt karışımları hazırlanmış ve n-bütanol ilaveli karışımlar test edilerek dizel yakıtına göre karşılaştırması yapılmıştır. Deney yakıtı olarak %10, %20, %25 ve %30 hacimsel oranında % 99,7 saflıktaki etanol ile dizel yakıtı karışımı hazırlanmıştır. Hazırlanan karışımlar bekletilerek faz ayrışması olup olmadığı kontrol edilmiştir. Etanol ile dizel yakıtının tüm karışım oranlarında 5 dakika ile 72 saat arasında değişen süre sonunda faz ayrışmasına uğradığı belirtilmiştir. Bu problemi gidermek amacıyla tüm karışımlara %5 oranında n-bütanol ilave edilerek yeni karışımlar hazırlanmıştır. Karışımlardaki faz ayrışması 3 karışımında 11-14 gün arasında gerçekleşirken %5 n-bütanol, %10 etanol ve %85 dizel yakıtı (Z5E10D85) karışımında faz ayrışması olmadığı belirtilmiştir. Deneyler tek silindirli, su soğutmalı, S195 motorunda 1500 ve 2000 d/dk.'da gerçekleştirilmiştir.

Deney sonuçlarına göre, karışımdaki etanol oranı arttıkça yakıt tüketimi, etanolün düşük ısıl değerinden dolayı farklı karışımlarda farklı yüklerde %5,2 ve %31,5 arasında artış göstermiştir. Isıl verimde farklı yüklerde ve karışımlarda artış ve azalma kaydedilmiştir. CO emisyonunda dizel yakıtına göre sırasıyla %31,7 ve %43,9 azalma gerçekleşmiştir. HC emisyonunda 1500 d/dk.'da artış ancak 2000 d/dk.'daki yükte azalma gerçekleşmiştir. NO_x emisyonu 1500 d/dk.'da %20, %25 ve %30 etanol karışımlarında azalmış ancak 2000 d/dk.'da sabit kalmamak üzere artış ve azalış göstermiştir. Duman emisyonunda ise %16,7 ve %87,5 oranında azalma gerçekleşmiştir. Bundan sonra yapılacak çalışmalarda n-bütanol ilavesinin

yüzdesini artırılmasının incelebileceği belirtilmiştir. Ayrıca, n-bütanolün etanol ile dizel yakıtı karışımlarında yakıt kararlılığını sağlayan çok iyi bir katkı maddesi olduğu, alternatif olarak biyoyakıt kullanımının artması ve n-bütanolün yakıt özellikleri bakımından etanol ve metanole göre üstün olmasının n-bütanolü gelecekte önemli bir alternatif yakıt haline getireceğine vurgu yapılmıştır.

Ballesteros ve diğ. [75] euro normlarına uygun bir dizel motorunda farklı oranlarda biyoetanol ile dizel ve n-bütanol ile dizel karışımlarının kullanılmasının karbon bileşimlerinin oluşumuna etkilerini incelemiştir. Deney yakıtı olarak dizel yakıtı ile %10 hacimsel karışım oranında biyoetanol ve %16 karışım oranında n-bütanol karışımı kullanılmıştır. Deneyler ara soğutuculu, turboşarjlı, partikül filtresine sahip euro-5 normalarına uygun nissan motorunda gerçekleştirilmiştir.

Deney sonuçlarına göre, karbon bileşikleri emisyonu bakımından her iki karışımın dizel yakıtı yerine kullanılabileceği belirtilmiştir. n-Bütanol karışım oranının etanole göre yüksek olmasının nedeni n-bütanolün (%21,6) etanole (%34,73) göre daha az oksijen içermesi olarak gösterilmiştir. Bu nedenle karışımların oksijen içeriğinin yakın değerde olması amaçlanmıştır. Alkoller arasında dizel yakıtı ile karışım hazırlamada en çok etanolün kullanıldığı ancak etanol yerine dizel yakıtı ile karışım oluşturabilecek ekonomik ve sürdürülebilir potansiyele sadece n-bütanolün sahip olduğu ve n-bütanolün yüksek karbon sayısı, ısı değeri ve faz kararlılığı sayesinde dizel yakıtı ile yüksek oranlarda karışım oluşturma özelliğine sahip olduğu belirtilmiştir. Etanolün dizel yakıtı ile karışım oluşturmada setan sayısının düşüklüğü nedeniyle tutuşma gecikmesinin uzun olması, ısı değerinin düşük olması, zayıf yağlama özelliği, düşük sıcaklıklarda su tutması nedeniyle sınırlı karışım oluşturma gibi olumsuzlukları olduğu vurgulanmıştır. Bu nedenle karışımdaki etanol oranının yüksek olması faz ayrışmasına neden olacağından karışım oranı %10 olarak belirlenmiştir.

Rakopoulos ve diğ. [76] ağır vasıta bir aracın direkt püskürtmeli dizel motorunda etanol ve n-bütanolün dizel yakıtı ile karışımının motor performansına bağlı olarak ısı salımını incelemiştir. Yenilenebilir bir yakıt olarak n-bütanolün metanol ve etanole göre düşük su tutma ve yüksek ısı değeri, yüksek setan sayısı, düşük buhar basıncı ve dizel yakıtı ile yüksek karışabilme özelliğine sahip olduğu ve bu özellikleri sayesinde dizel yakıt ile karışım oluşturmada tercih edilen bir yakıt

olacağı belirtilmiştir. Literatürde dizel motorlarında n-bütanol ile dizel yakıtı karışımlarının kullanılması ile ilgili yapılan çalışma sayısının çok az olduğu vurgulanmıştır. Deney yakıtı olarak, %5 (Et5-D) ve %10 (Et10-D) etanol ile dizel yakıtı, %8 (Bu8-D) ve % 16 (Bu16-D) n-bütanol ile dizel yakıtı karışımları hazırlanmış ve sadece etanol karışımlarının içerisine emülsiyon maddesi olarak %1,5 oranında tutuşma gecikmesini azaltıcı Betz GE tarafından üretilen katkı maddesi katılmıştır. Deneyler altı silindirli, direkt püskürtmeli, su soğutmalı, turboşarjlı mercedes OM 366 LA motorunda 1200 ve 1500 d/dk.'da, sırasıyla %20, %40, %60, %100 yüklerde gerçekleştirilmiştir.

Deney sonuçlarına göre, yakıt enjeksiyon basınç diyagramında çok az bir gecikme gözlenmiştir. Tutuşma gecikmesi süresinde artış, maksimum silindir basıncında çok az azalma ve yanmanın birinci aşamasındaki silindir sıcaklığında azalma kaydedilmiştir. Özgül yakıt tüketiminde karışım oranı arttıkça artış gözlenmiştir. Özellikle etanol karışımlarında düşük ısıl değerden dolayı yakıt tüketimi artmıştır. Isıl verimin karışım oranı arttıkça çok az artış gösterdiği belirtilmiştir. Tüm karışımlarda duman koyuluğu ve NO_x emisyonu karışım oranı arttıkça azalmıştır.

Armas ve diğ. [77] etanol ile dizel ve n-bütanol ile dizel karışımlarının soğukta ilk çalışma esnasında ortaya çıkan emisyonlarını incelemişlerdir. Alkollerden etanol ve metanole göre daha avantajlı ve bu alkollere rakip olabilecek nitelikte olan n-bütanol ile ilgili çok çalışma olmamasına rağmen n-bütanolün giderek önemli hale geldiği ve n-bütanolün etanole göre düşük polar özellik göstermesinden dolayı dizel yakıtı ile daha iyi karışabildiği vurgulanmıştır. Literatürde yapılan çalışmaların kararlı şartlarda yapıldığı ancak alkol ile dizel yakıtı karışımlarının ilk çalışma sıcaklığı olarak soğukta $15^{\circ}\text{C} \leq T \leq 20^{\circ}\text{C}$ aralığında ve $T > 20^{\circ}\text{C}$ sıcaklığında yeterli çalışmanın yapılmadığı belirtilmiştir. Bu maksatla yapılan çalışmada deney yakıtı olarak %10 etanol ile dizel karışımı ve %16 n-bütanol ile dizel yakıtı karışımı hazırlanmıştır. Deneyler dört silindirli, turboşarjlı, common-rail yakıt sistemine ve EGR sistemine sahip nissan motorunda sıcak ve soğuk çalışma şartlarında gerçekleştirilmiştir.

Deney sonuçlarına göre, soğuk çalışma şartlarında referans alınan dizel yakıtına göre alkol içeren yakıt karışımlarında stabil olmayan yanma ve NO_x, HC ve

CO emisyonlarında artış gözlemlenmiştir. Bunun sebebi olarak düşük setan sayısı ve yüksek buharlaşma entalpisi gösterilmiştir. Sıcak çalışma şartlarında alkol karışumlu yakıtlarda duman ve partikül emisyonunda azalma kaydedilmiştir. Bunun sebebi olarak yakıt karışımlarının oksijen içeriği gösterilmiştir. Buna göre de emisyon bakımından etanol ile dizel karışımının n-bütanol ile dizel karışımına göre çok az düşük emisyon yaydığı vurgulanmıştır.

Rakopoulos ve diğ. [78] yüksek hızlı direkt püskürtmeli dizel motorundada n-bütanol ile dizel yakıtı karışımı kullanımının motor performansı ve emisyonlarına etkilerini incelemişlerdir. Deney yakıtı olarak %8, %16 ve %24 karışım oranlarında n-bütanol ile dizel yakıtı karışımı kullanılmıştır. Bu karışımlarda faz ayrışması gerçekleşmediği vurgulanmıştır. Deneyler elektrikli dinamometrede, tek silindirli, direkt püskürtmeli, su soğutmalı, yüksek hızlı ricardo/cussons 'hydra' motorunda 2000 d/dk.'da, 250 bar püskürtme basıncında, 29° püskürtme avansında, üç yakıt karışımı için sırasıyla 1,40, 2,57 ve 5,37 bar ortalama efektif basınç değerinde düşük, orta ve yüksek yüklerde ayrı, ayrı gerçekleştirilmiştir.

Deney sonuçlarına göre, karışımdaki n-bütanol oranı arttıkça özgül yakıt tüketiminde ve ısıl verimde çok az artış, egzoz gaz sıcaklığında ise azalma kaydedilmiştir. NO_x, CO ve duman emisyonlarında azalma gerçekleşirken, HC emisyonunda ise artış gözlenmiştir. Metanol ve etanole göre daha iyi yakıt özelliklerine sahip olan n-bütanolün dizel motorlarında alternatif yakıt olarak kullanılabileceği vurgulanmıştır.

Rakopoulos ve diğ. [79] tarafından yapılan diğer bir çalışmada farklı bir dizel motorunda n-bütanol ile dizel yakıtı karışımları kullanılmasını motor performansı ve emisyonu yönünden incelenmiştir. Kyoto protokolü ile belirlenen egzoz emisyon oranının sağlanması ve Avrupa Birliğinin fosil kökenli yakıtlara biyoyakıt katılması gibi hedeflerinin olması nedeniyle ülkelerin biyoyakıtlara yöneldiği belirtilmiştir. Çalışmada n-bütanolün kullanılmasının nedeni olarak etanole göre yakıt özelliklerinin dizel yakıtı özelliklerine daha yakın olması gösterilmiştir. Deney yakıtı olarak %8 ve %16 n-bütanol ile dizel yakıtı karışımları hazırlanmıştır. Deneyler altı silindirli, direkt püskürtmeli, su soğutmalı, turboşarjlı mercedes OM 366 LA motorunda gerçekleştirilmiştir.

Deney sonuçlarına göre, karışımların düşük setan sayısından dolayı tutuşma gecikmesinin süresi uzamıştır. n-Bütanol karışım oranı arttıkça duman emisyonunun önemli ölçüde, NO_x emisyonu çok az ve CO emisyonunda azalma, HC emisyonunda ise artış kaydedilmiştir. Karışım oranı arttıkça yakıt tüketimi ve ısı verim çok az artmıştır. Setan artırıcı ve çözünmeyi sağlayıcı bir madde kullanılmadan n-bütanolün iyi bir motor performansı ve emisyonu için dizel motorlarda güvenle ve yüksek karışım oranlarında kullanılabileceği belirtilmiştir.

Doğan [80] bir dizel motorunda n-bütanol ile dizel yakıtı karışımı kullanımının motor performansı ve emisyonuna etkisini incelemiştir. Etanol ve metanole göre n-bütanolün yakıt özelliklerinin dizel yakıtına yakın olduğu vurgulanmıştır. Özellikle kendiliğinden tutuşma sıcaklığının etanol ve metanole göre daha düşük olması dizel motorunda kolaylıkla yanabileceği, yüksek setan sayısı sayesinde dizel motorlar için etanol ve metanole göre daha uygun bir katkı maddesi olduğu, aşındırıcı etkisinin düşük, enerji içeriğinin yüksek olduğu, dizel yakıtı ile karıştırıldığında herhangi bir faz ayrışmasının olmadığı belirtilmiştir. Deney yakıtı olarak %5 (B5), %10 (B10), %15 (B15) ve %20 (B20) karışım oranlarında n-bütanol ile dizel yakıtı karışımı kullanılmıştır. Deneyler tek silindirli, dört zamanlı, hava soğutmalı katana KM 170 F motorunda 2600 d/dk.'da ve farklı yüklerde gerçekleştirilmiştir.

Deney sonuçlarına göre, özgül yakıt tüketimi B20 karışımı kullanımında farklı yüklerde %3,2 ve %2,9 artış göstermiştir. Bunun sebebi olarak, karışımın düşük ısı değerine sahip olması gösterilmiştir. Ancak B5 ve B10 karışımlarında özgül yakıt tüketimi açısından önemli bir etki olmamıştır. Isıl verim ise B20 karışımında %33,73 olarak ölçülürken dizel yakıtında %33,04 olarak ölçülmüştür. Bunun durum karışımın oksijen içeriğinin yüksek olması ve karışımın setan sayısının düşük olmasıyla tutuşma gecikmesi süresinin artmasına dayandırılmıştır. Diğer bir etken ise alev yayılma hızı olarak gösterilmiştir. Dizel yakıtı alevinin yayılma hızı 33 cm/s iken n-bütanolün oluşturduğu alev yayılma hızı 45 cm/s olarak belirtilmiştir. Yüksek alev yayılma hızının ısı verimliliği artırdığı vurgulanmıştır. Egzoz gazı sıcaklığının n-bütanol kullanımında biraz azaldığı görülmüştür. Bunun sebebi olarak, yüksek oksijen içeriğinin yanma odasında yanma sonunda gizli ısı olarak buharlaşması neticesinde düşük egzoz gazı sıcaklığına neden olmasına dayandırılabilirliği belirtilmiştir. NO_x emisyonu dizel yakıtına göre daha düşük

bulunmuştur. Bunun durum n-bütanol karışımı kullanımında yanma odasındaki oksijen oranının artması ve karışımın düşük setan sayısının yol açtığı uzun tutuşma gecikmesi ile yanma sıcaklığının artmasına neden olması ancak karışımın düşük enerji içeriği ve yüksek buharlaşmasından dolayı alev sıcaklığının genellikle NO_x emisyonu oluşumu açısından düşük olmasına dayandırılmıştır. HC emisyonu dizel yakıtına göre yüksek bulunmuştur. Bunun sebebi olarak, düşük setan sayısının neden olduğu uzun tutuşma gecikmesi süresinin, yüksek buharlaşma ısısına sahip karışımın yavaş, yavaş buharlaşmasına neden olmasıyla birlikte HC emisyonunda artışa sebebiyet vermesi referanslara dayandırılarak açıklanmıştır. CO ve PM emisyonunda ise karışımdaki n-bütanol oranı arttıkça azalma kaydedilmiştir. Bunun sebebi olarak ise dizel yakıtına göre karışımın yüksek oksijen ve düşük karbon içeriğine sahip olması gösterilmiştir.

Siwale ve diğ. [81] turboşarjlı bir dizel motorunda n-bütanol ile dizel yakıtı karışımlarının emisyon karakteristiklerini incelemişlerdir. Yüksek karbon sayısı ve iyi çözücü özelliği sayesinde n-bütanolün herhangi bir katkı maddesine gerek olmadan dizel yakıtı ile her oranda karıştırılabileceği ve ayrıca bitkisel yağların yüksek viskozitesini azaltma ve diğer akış özelliklerinin iyileştirmesinde de kullanılabileceği vurgulanmıştır. Deney yakıtı olarak %5, %10 ve %20 oranlarında n-bütanol ile dizel yakıtı karışımı kullanılmıştır. Deneyler dört silindirli, turboşarjlı direkt püskürtmeli volkswagen motorunda farklı püskürtme avans değerlerinde, sırasıyla 1500, 2500, 3000 ve 3500 d/dk.'da ve sırasıyla %25, %50, %75, %100 yük altında gerçekleştirilmiştir.

Deney sonuçlarına göre, NO_x emisyonunda yük ve devir arttıkça artış, CO emisyonunda ise düşüş kaydedilmiştir. HC emisyonunda 1500 d/dk.'da %75 yük altında artış, bu yük altında 3000 d/dk.'da ise düşüş gözlenmiştir. Duman emisyonunda önemli derecede azalma kaydedilmiştir. Bu azalmanın n-bütanolün çok küçük oranlarda dizel yakıtı ile karıştırılmasında büyük avantaj sağlayacağı vurgulanmıştır.

Zhang ve diğ. [82] düşük sıcaklıkta yanma sağlayan dizel motorunda dizel yakıtı ile n-bütanol karışımı kullanımının motor performansı ve emisyonuna etkisini incelemiştir. Dizel motorunda kullanılan alternatif yakıtlar arasında yer alan n-bütanolün son yıllarda giderek popüler hale geldiği belirtilmiştir. Deney yakıtı

olarak %20 (B20) ve %40 (B40) karışım oranlarında n-bütanol ile dizel yakıtı ile karışımı kullanılmıştır. Deneyler tek silindirli, dört zamanlı, EGR ve common-rail yakıt sistemine sahip dizel motorunda maksimum moment devri olan 1400 d/dk.'da gerçekleştirilmiştir. Deney sonuçlarına göre, karışımdaki n-bütanol oranı arttıkça tutuşma gecikmesi süresi artmakta ve ani yanma safhasındaki $dp/d\phi$ oranı artış göstermekte ve böylece ısı veriminde artış gerçekleşmiştir ve B40 karışımında %1'den daha az bir artış kaydedilmiştir. Karışımdaki n-bütanol oranı arttıkça duman emisyonu azalmış ve B40 karışımında en düşük değer elde edilmiştir. Karışımdaki n-bütanol oranı ve motorun EGR oranı arttıkça HC, CO ve NO emisyonlarında azalma, NO₂ emisyonunda ise artış gerçekleşmiştir.

Gerardo ve diğ. [83] ön karışimli ve düşük sıcaklıkta yanma sağlayan yüksek hızlı bir dizel motorunda n-bütanol ile dizel yakıtı karışımları kullanımının motor performansı ve emisyonlarına etkilerini incelemişlerdir. Dizel motorlarında etanol ve metanol kullanılmasında düşük çözünme özelliklerinden dolayı birçok kritik problemin ortaya çıktığı ve düşük viskozitenin de özellikle modern yakıt sistemine sahip motorlarda yağlama problemi nedeniyle enjektörlere zarar verdiği vurgulanmıştır. Bu nedenle yapılan çalışmada metanol ve etanole göre yakıt özellikleri bakımından daha iyi olan n-bütanol kullanılmıştır. Deney yakıtı olarak %20 (BU20) ve %40 (BU40) karışım oranlarında n-bütanol ile dizel yakıtı karışımları ve sadece n-bütanol (BU00) kullanılmıştır. Deneyler dört silindirli, turboşarjlı, EGR ve common-rail yakıt sistemine sahip motorda farklı EGR oranı, püskürtme basıncı ve püskürtme zamanında gerçekleşmiştir. Deneylerde püskürtme başlangıcından önce bir miktar yakıt püskürtülerek düşük sıcaklıkta yanmanın sağlanması ile motor performansında azalma olmaksızın emisyonun azaltılması amaçlanmıştır. Deney sonuçlarına göre, BU20 ve BU40 yakıtlarında NO_x emisyonunda artış, duman emisyonunda çok iyi miktarda azalış ve özgül yakıt tüketiminde ise %5 ile %7 arasında artış gerçekleşmiştir.

Lin ve diğ. [84] bir dizel motorunda kullanılan n-bütanol ile dizel karışımına su ilave edilmesiyle NO_x, PM ve polisayklic aromatik hidrokarbon (PAH) emisyonlarının azaltılmasını incelemişlerdir. Dizel motorlar için biyodizel ve etanolün çok popüler yenilenebilir yakıtlar olduğu ancak tarım alanlarının ve ürünlerin yetersizliği, üretim maliyeti ve emisyonları nedeniyle biyodizelin ve düşük

setan sayısından dolayı etanolün dizel motorlarında kullanımının sınırlandırıldığı belirtilmiştir. Diğer taraftan yenilenebilir bir yakıt olan n-bütanolün benzinli motorlarda benzinin yerine saf halde veya karışım yoluyla, dizel motorlarında ise etanole göre yüksek setan sayısı sayesinde dizel yakıtı ile karışım oluşturmak suretiyle kullanılabilmesi vurgulanmıştır. Dizel motor emisyonlarını azaltmak amacıyla yapılan bu çalışmada deney yakıtı olarak öncelikle %0,5 ile %1 oranlarında su bulunan n-bütanol dizel yakıtı ile karıştırılmıştır. Daha sonra bu karışıma %99,5 saflığındaki n-bütanol %15 ile %25 oranında ilave edilerek 1 litrelik kapta 3000 d/dk.'da 15 dakika süreyle karıştırılmıştır. Hazırlanan yakıt karışımlarının kararlılığı 25 °C oda sıcaklığında 30 gün süreyle gözlenmiştir ve faz ayrışması gerçekleşmemiştir. Deneylerde tek silindirli, dört zamanlı, direkt püskürtmeli, su soğutmalı yanmar motoru kullanılmıştır. Deney sonuçlarına göre, karışımlardaki n-bütanol oranı arttıkça özgül yakıt tüketimi ve CO emisyonu artış gösterirken, PM ve PAH emisyonlarının azaldığı kaydedilmiştir. Aynı zamanda düşük sıcaklıklardaki yanmalarda NO_x emisyonunda azalma gözlenmiştir.

Yao ve diğ. [85] dizel motorunda dizel yakıtı ile n-bütanol karışımının motor performansı ve emisyonlarına etkilerini incelemiştir. Alternatif yakıt olan n-bütanolün kimyasal yapısında %21,6 oranında oksijen olduğu ve alkollerde karbon miktarı arttıkça alt ısı değerinin arttığı, buharlaşma ve alevlenme sıcaklığının azaldığı, bu durumda n-bütanolün düşük devirlerde ateş alma problemi ile karşılaşmayacağı belirtilmiştir. Alkoller alkil ve hidroksilden oluşmaktadır, alkol içerisindeki karbon oranı ne kadar artarsa alkollerin dizel yakıtı ile karışım oluşturması o kadar kolaylaştığı ve n-bütanolün bu özellikleri sayesinde düşük karbonlu alkollere göre potansiyel bir katkı olduğu vurgulanmıştır. Deney yakıtı olarak %5, %10 ve %15 karışım oranında n-bütanol dizel yakıtı ile karışımları kullanılmıştır. Deneyler altı silindirli, su soğutmalı, common-rail yakıt sistemine ve EGR valfine sahip, turboşarjlı motorda gerçekleştirilmiştir. Motorda yakıt püskürtmesi sırasında krank açısına bağlı tek, pilot ve son olmak üzere 160 MPa basıncında üç püskürtme stratejisi uygulanmıştır. Testler sırasında euro-5 ve 6 normlarına uygun olması için EGR yardımıyla NO_x emisyonu 2 g/kWh değerinde ayarlanmıştır.

Deney sonuçlarına göre, her püskürtme stratejisinde n-bütanol içeriğindeki oksijen sayesinde is ve CO emisyonunu yakıt tüketimine önemli bir etki yapmaksızın

büyük ölçüde azalmıştır. NO_x değeri sabit olduğundan karışımlar bu değere etki etmemiştir. Isı salımında karışımların alt ısı değerlerinin düşük olması nedeniyle dizel yakıtına göre azalma kaydedilmiştir. Karışımların yakıt tüketiminde çok fark olmadığı, ısı verim ve yanma veriminde kayıp yaşanmadığı belirtilmiştir. Enjeksiyon ayarlarının dikkatli yapılmasıyla emisyonların azaltılabileceği vurgulanmıştır.

Rakopoulos ve diğ. [86] biyodizel ve n-bütanolün dizel yakıtı ile karışımlarının turboşarjlı bir dizel motorundaki emisyonlarını incelemiştir. Dizel motorlarından kaynaklanan emisyonların azaltılmasında en önemli yöntem olarak biyoyakıtların kullanılması gösterilmiştir. Biyoyakıtlardan olan biyodizelden başka dizel motorlarında kullanılacak biyoyakıtlardan olan n-bütanol konusunda çok fazla çalışmanın bulunmadığı vurgulanmıştır. Etanole göre yüksek setan sayısı, yüksek ısı değeri ve düşük buhar basıncı sayesinde n-bütanolün dizel yakıtı ile daha iyi karışım oluşturduğu belirtilmiştir. Biyodizel ve n-bütanolün dizel motorundaki NO ve duman koyuluğu emisyonlarını karşılaştırmak amacıyla yapılan çalışmada, ayçiçek yağı ve pamuk yağı metil esterleri eşit oranda karıştırılmıştır ve bu karışım %30 oranında dizel yakıtı ile karıştırılarak birinci deney yakıtı hazırlanmıştır. İkinci deney yakıtı olarak ise %25 karışım oranında n-bütanol dizel yakıtı ile karıştırılmıştır. Hazırlanan n-bütanol karışımında faz ayrışması gerçekleşmemiştir. Deneyler altı silindri, direkt püskürtmeli, su soğutmalı, turboşarjlı, euro-2 normuna sahip mercedes OM 366 LA motorunda farklı yüklerde olmak üzere üç farklı test prosedüründe gerçekleştirilmiştir.

Deney sonuçlarına göre, her iki biyoyakıt karışımının NO emisyonunda dizel yakıtına göre artış kaydedilmiştir. Bu artış biyodizel karışımında %52 oranında, n-bütanol karışımında ise %35 oranında gerçekleşmiştir. Biyoyakıt karışımlarının duman koyuluğunda azalma kaydedilmiştir. Bu azalma biyodizel karışımında %40 oranında, n-bütanol karışımında ise %73 oranında gerçekleşmiştir.

Rakopoulos ve diğ. [87] tarafından aynı deney düzeneğinde ve aynı biyoyakıt karışımları (%30 biyodizel ve %25 n-bütanolün dizel yakıtı ile karışımı) kullanılarak farklı deney prosedürüne göre yapılan diğer bir çalışmada ise NO emisyonu, duman koyuluğu ve gürültü yayılımı incelenmiştir. Biyoyakıtlarla ilgili literatürde yapılan çalışmalarda motorun kararlı halinin göz önüne alındığı ancak dizel motorun ilk

çalıştırmadaki durumunun göz ardı edildiği vurgulanmıştır. Bu maksatla yapılan çalışmada dizel motorlar için önemli olan iki emisyonun yanı sıra diğer çalışmalarda sıkça ihmal edilen ancak araç içindeki yolcular ve dışarıdaki yayalar için giderek önemli hale gelen motor gürültüsüne neden olan yanma gürültüsü incelenmiştir. Deneyler motor sıcaklığı 80 °C'ye gelene kadar deney motorunun 950 d/dk. olan rölanti devrinde önce dizel yakıtı ile sonra diğer iki biyoyakıt karışımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Deney sonuçlarına göre, düşük devirde turboşarjın devrede olmaması her yakıt için en uç değerdeki emisyonunun oluşmasına neden olmuştur. Düşük krank hızının motordaki yanma gürültüsünün oluşmasında baskın bir etkiye sahip olduğu vurgulanmıştır. Düşük hızdaki yanma kararlılığının n-bütanol karışımında daha iyi olduğu kaydedilmiştir. Yanma gürültüsüne her iki karışımın çok az etkide bulunduğu belirtilmiştir. NO emisyonu her iki karışımında dizel yakıtına göre sırasıyla biyodizelde %30 oranında, n-bütanol karışımında ise %51 oranında artış kaydedilmiştir. Duman koyuluğunda biyodizel karışımında %40 oranında artış, n-bütanol karışımında ise %69 oranında düşüş kaydedilmiştir.

Fernandez ve diğ. [88] bir dizel motorunda yüksek karbon sayısına sahip alkollerin dizel yakıtı ile karışımlarının motor performansına etkilerini karşılaştırmışlardır. Metanol ve etanol gibi düşük karbonlu alkollerin dizel yakıtı içinde tam çözünemediği belirtilmiştir. Alkolün yapısındaki karbon sayısının artmasına paralel olarak, oksijen miktarının azalmasına rağmen, setan sayısının, yoğunluğunun ve ısı değerinin artış gösterdiği, kendi kendine tutuşma sıcaklığının ve vuruş eğiliminin azaldığı vurgulanmıştır. Dizel motorlar için alternatif yakıt olarak yüksek karbonlu alkollerin kullanımı ile ilgili çok az sayıda çalışma bulunduğu vurgulanmıştır. Yapılan çalışmada dizel yakıtı yerine kullanılabilecek n-bütanol ve 1-pentanolü kapsayan dizel yakıtı ile alkol karışımlarının motor performanslarına göre en ideal alkol tipinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Deney yakıtı olarak, n-bütanolün %10 (B10), %15 (B15), %20 (B20), %25 (B25) ve %30 (B30), 1-pentanolün ise %10 (P10), %15 (P15), %20 (P20) ve %25 (P25) karışım oranlarındaki dizel yakıtı karışımları hazırlanmıştır. Hazırlanan karışımlarda n-bütanol ve 1-pentanolün dizel yakıtı ile çok iyi çözündüğü ve faz ayrışması problemi olmadığı gözlenmiştir ve herhangi bir katkı ilave etmeye gerek olmadığı

vurgulanmıştır. Deneyler elektrikli dinamometrede, üç silindirli, dört zamanlı, direkt püskürtmeli perkins AD 3-152 motorunda 1200 ile 2400 d/dk. aralığında gerçekleştirilmiştir. Yakıt içindeki n-bütanol ve 1-pentanolün karışım yüzdesi arttıkça artan oksijen miktarına bağlı olarak karışımın ısıl değerinin azaldığı ve oksijen miktarının yanmaya olumlu etki ettiği belirtilmiştir. Karışımların düşük viskozitelerinin yağlamaya olumsuz etki yapmadığı kaydedilmiştir.

Deney sonuçlarına göre, güç ve moment değerleri dizel yakıtına benzer, n-bütanolün özgül yakıt tüketiminin 1-pentanol ve dizel yakıtına göre daha iyi olduğu kaydedilmiştir. B30 ve P25 yakıtlarının dizel yakıtı yerine dizel motorlarında herhangi bir modifikasyon yapmadan ve motor performansında bir düşüş yaşanmadan kullanılabileceği belirtilmiştir.

Özer [89] dizel motorunda 2-bütanol ile dizel yakıtı karışımı kullanımının motor performansı ve egzoz emisyonlarına etkilerini incelemiştir. Deney yakıtı olarak %3, %5, %8 ve %10 karışım oranlarında 2-bütanol ile dizel yakıtı karışımı kullanılmıştır. Deneyler elektrikli dinamometrede, tek silindirli, dört zamanlı, direkt püskürtmeli bir dizel motorunda 2600 d/dk.'da gerçekleştirilmiştir. Deney sonuçlarına göre, karışım içindeki 2-bütanol oranı arttıkça güç ve ısıl verimde düşüş, özgül yakıt tüketiminde ise artış kaydedilmiştir. Karışım içindeki 2-bütanol oranı arttıkça CO, NO_x ve is emisyonlarında düşüş, HC emisyonunda ise artış gerçekleşmiştir. Genel olarak 2-bütanolün yüksek oranlarda kullanılmasının motor performansını azalttığı fakat emisyonlarda iyileşme sağladığı vurgulanmıştır.

Karabektaş ve Hoşöz [90] dizel motorunda izobütanol ile dizel yakıtı karışımları kullanımının motor performansı ve emisyonlarına etkilerini incelemiştir. Alkollerin dizel motorlarında kullanılmasında düşük setan sayısı nedeniyle ortaya çıkan problemleri gidermek için kullanılan yöntemler, alkolün buharlaştırılması, çift yakıt püskürtme, alkol ile dizel yakıtı karışımı oluşturma ve emülsiyonu şeklinde sıralanmıştır. Alkol ile dizel yakıtı karışımlarında tutuşma gecikmesi süresinin alkolün çeşidine ve karışımdaki yüzdesine bağlı olarak uzadığı belirtilmiştir. Ancak alkol kullanımının emisyonlarda önemli ölçüde iyileştirme sağladığı da vurgulanmıştır. Ayrıca, metanol ve etanole göre yüksek setan sayısı, ısıl değeri ve düşük oksijen içeriği ile dizel yakıtı ile karışım oluşturmada ve etanol ile dizel karışımlarının faz kararlığının sağlanmasında çok etkili olan alkol çeşidinin

bütanol olduğu belirtilmiştir. Yapılan çalışmada bütanolün izomerlerinden biri olan izobütanol kullanılmıştır. Deneysel yakıt olarak %5, %10, %15, ve %20 karışım oranlarında izobütanol ile dizel yakıt karışımları kullanılmıştır. Deneyler tek silindirli, direkt püskürtmeli süperstar dizel motorunda 1200 ile 2800 d/dk. aralığında ve 200 devirlik periyotlar halinde gerçekleştirilmiştir. Deneysel sonuçlarına göre, karışımların düşük ısı değerlerine bağlı olarak güçte ve egzoz gaz sıcaklığında azalma gerçekleşmiştir. Karışımındaki izobütanol oranı arttıkça CO, NO_x emisyonlarında düşüş, HC emisyonunda ise artış kaydedilmiştir. İzobütanolün %20 karışım oranına kadar dizel motorunda kullanılabilmesine rağmen, %10 karışım oranında kullanıldığında motor performansı ve emisyonlar açısından optimum değerlerin elde edildiği vurgulanmıştır.

Lapuerta ve diğ. [91] metanol, etanol, propanol, bütanol ve pentanol olmak üzere beş çeşit alkolün dizel yakıtı ile karışımlarındaki faz kararlılığı, yağlama özelliği, viskozite ve soğuk akış özelliklerini incelemiştir. Alkoller dizel motorlar için yapısındaki hidroksil molekülleri ile duman formasyonu ve partikül emisyonunu azaltma kapasitesi ve dizel yakıtı ile karışım oluşturabilecek potansiyele sahip bir bileşen olarak tanımlanmıştır.

Çalışma sonucuna göre, karışımın faz kararlılığı açısından alkol ile dizel karışımlarında yakıt kararlılığı sıcaklık, nem ve alkol ile dizel yakıt karışım oranına bağlı olduğu ve bazı hallerde faz ayrışmasının gerçekleştiği belirtilmiştir. Etanol ve metanolün dizel yakıtı ile karışımlarında nemden ve sıcaklığın düşmesine bağlı olarak bir süre sonra faz ayrışmasının gerçekleştiği vurgulanmıştır. En iyi faz kararlılığını sağlayan alkol çeşidi olarak düşük karbonlu alkollere göre daha az polariteye sahip olan propanol, bütanol ve pentanol gösterilmiştir. Bu alkollerin faz ayrışması ancak jel kıvamı olarak tanımlanmıştır ve yüksek karışım oranlarında sıvı faz ayrımının görüldüğü kaydedilmiştir. Yağlayıcılık özelliği açısından alkollerin dizel yakıtı standartlarına göre çok kötü olmasına rağmen kısa karbon zincirli alkollerin dizel yakıtı ile karışımlarında beklenenden iyi olduğu vurgulanmıştır. Yapılan çalışmada alkollerin artan moleküler ağırlığına bağlı olarak yağlayıcılık özelliğinin azaldığı tespit edilmiştir. Molekül ağırlığı en yüksek olan pentanol en kötü yağlama özelliğine sahip alkol olarak gösterilmiştir ve EN590 standartlarına göre sırasıyla dizel yakıtı ile karışımlarda %92 etanol, %80 propanol, %35 bütanol

ve %10 pentanol karışım oranından daha fazla oranda alkol kullanılması durumunda yağlayıcılık özelliğinin olumsuz etkilendiği vurgulanmıştır. Viskozite açısından yapılan değerlendirmede alkollerin dizel yakıtı ile karışımlarında düşük viskoziteden dolayı karışım kararlılığının olumsuz etkilendiği belirtilmiştir. Alkol ile dizel yakıtı karışımlarında viskozitenin genel olarak azaldığı ancak bütanol ve pentanol karışımlarının dizel yakıtına en yakın viskozite değeri gösteren karışımlar olduğu belirtilmiştir. Soğuk akış özellikleri bakımından yüksek karbon sayısına sahip alkollerin düşük karbonlu alkollere göre daha iyi olduğu vurgulanmıştır.

2.3 Dizel Yakıtı ile Üçlü Karışım

Lefol ve diğ. [92] bir dizel motorunda dizel yakıtı ile etanol karışımına üçüncü bilşen olarak biyodizel veya bitkisel yağ ilave edilmesinin yaydığı emisyonların profilini incelemiştir. Yakıt özelliklerinin değişmesinin taşıt kaynaklı oluşan emisyonların azaltılmasında bir etki gösterdiği vurgulanmıştır. Bu kapsamda deney için ilk etapta dizel yakıtı ile etanol ve çeşitli bitkisel yağlar ve bunların biyodizellerinden oluşan 45 adet yakıt karışımı hazırlanmış ve dayanıklılıkları test edilmiştir. Karışımlar 90 gün süreyle bekletilmiştir. Kararlı faz sergileyen karışımlar arasından altı farklı yakıt karışımı seçilmiştir. Karışımlara etanol ilave edildiğinde karışımın yoğunluğu azalmış ancak biyodizel veya bitkisel yağ ilave edildiğinde bu azalma engellenmiştir. Dizel yakıtı ile etanol karışımlarına bitkisel yağ ve biyodizel ilave edildiğinde ise viskozite değeri dizel yakıtına benzer çıkmıştır. Deneyler iki silindri, direkt püskürtmeli, hava soğutmalı M790 agrale dizel motorunda, 1800 ve 2000 d/dk.'da, değişik yüklerde gerçekleştirilmiştir.

Deney sonuçlarına göre, yakıt tüketiminde önemli bir azalış ve artış olmamıştır. Hintyağı ve biyodizeli kullanımında özgül yakıt tüketiminde artış olduğu gözlemlenmiştir. Karışımların yaydığı 18 karbon bileşimi (CC) miktarı dizel yakıtına göre yüksek bulunmuştur. Ancak 6 karışım arasından hint yağı ve biyodizelinin yaydığı 18 CC emisyonu düşük çıkmıştır. NO_x haricindeki diğer emisyonlar artış göstermiştir. %90/10-dizel/etanol karışımı kullanıldığında diğer emisyonlarda azalma gerçekleşmiştir. Bitkisel yağ ve biyodizel ilave edildiğinde de benzer bir azalma kaydedilmiştir. CO emisyonunun da farklılık olmamış ve CO₂ emisyonunda 2000 d/dk.'da azalma gerçekleşmiştir. Biyodizel ve bitkisel yağların dâhil olduğu üçlü

karışımların dizel motorunda herhangi bir modifikasyon yapmadan kullanılabilceği belirtilmiştir.

Lujaji ve diğ. [93] bir dizel motorunda croton yağı, n-bütanol ve dizel yakıtı üçlü karışımlarının yakıt özelliklerini, motor performansını ve emisyonlarını incelemişlerdir. Yüksek karbon sayısına sahip alkol çeşidi olan n-bütanolün düşük karbon sayısına sahip alkollere göre düşük viskozitesi, yüksek setan sayısı ile dizel yakıtına yakın özelliklere sahip olduğundan dolayı karışım maddesi olarak kullanılabilceği ve aynı zamanda bitkisel yağlarla karıştırılmasında da geniş çalışma şartlarında mükemmel bir karışım sağladığı vurgulanmıştır. Bitkisel yağ ile n-bütanol karışımlarında muhtemel problem olarak n-bütanolün setan sayısının düşük olması ile tutuşma gecikmesi süresinin uzaması gösterilmiştir. Ancak bitkisel yağların setan sayısının yüksekliği ile bu dezavantajın giderilebileceği belirtilmiştir. Üç bileşenli deney yakıtları, croton megalocarpus yağı (CRO), n-bütanol (BU) ve dizel yakıtı (D2) laboratuvar ortamında oda sıcaklığında 5000 ml'lik deney kaplarında %15CRO, %5BU, %80D2 ve %10CRO, %10BU, %80D2'den oluşan oranlarda karıştırılarak hazırlanmıştır. Yakıt karışımlarında faz ayrışmasının gerçekleşmediği ve bitkisel yağın yakıt özelliklerinde iyileşmelerin olduğu kaydedilmiştir. Deneyler dört silindirli, turboşarjlı, direkt püskürtmeli audi motorunda 3000 d/dk.'da sırasıyla %0, %25, %50, %75 ve %100 yük altında gerçekleştirilmiştir.

Deney sonuçlarına göre, özgül enerji tüketiminde motor yükü arttıķça artış, ısı veriminde ise düşüş kaydedilmiştir. Üçlü karışımlarda yüksek silindir basıncına ve sıcaklığına ulaşıldığı ve buna bağlı olarak da ısı salımında artış görülmüştür. D2 yakıtına göre karşılaştırıldığında CO ve duman emisyonunda düşüş, HC emisyonunda artış ve NO_x emisyonunda ise aynı seviyede olduğu belirtilmiştir.

Lujaji ve diğ. [94] tarafından yapılan diğer bir çalışmada ise bitkisel yağ, biyodizel, n-bütanol ve dizel yakıtı karışımlarının ısı özellikleri ve setan sayıları incelenmiştir. Bitkisel yağların dizel motorlarında dizel yakıtının yerine kullanılabilceği ve emisyonları önemli ölçüde azaltacağı vurgulanmıştır. Ancak bitkisel yağların yüksek viskozite ve düşük buharlaşma özelliğine sahip olması dizel motorları için en önemli zorluk olarak gösterilmiştir. Literatürde yapılan çalışmalarda biyodizel, alkol ve dizel yakıtı üçlü karışımlarının yakıt kararlılığının çok iyi olduğu ve dizel motorlarında kullanılabilceği ancak bitkisel yağ, alkol ve

dizel yakıt karışımı ile ilgili literatür çalışmasının bulunmadığı vurgulanmıştır. Bitkisel yağların yüksek viskozitelerini azaltmak için en yaygın olarak kullanılan yöntemlerden birisinin transesterifikasyon yöntemi olduğu ancak bu yöntemde maliyet ve üretim süreci yönünden zorluklarının olduğu belirtilmiştir. Bu nedenle bitkisel yağların dizel motorlarında kullanılabilmesi için yakıt özelliklerinin iyileştirilmesi gerektiği vurgulanmıştır. Deney yakıtı olarak croton, hindistan cevizi ve jatropha curcas yağı ve bunlardan elde edilen biyodizelden %10 oranında, n-bütanolden %10 oranında ve dizel yakıtında ise %80 oranında karıştırılarak altı farklı üçlü karışım yakıtı hazırlanmıştır. Hazırlanan karışımlarda faz ayrışması gerçekleşmemiştir. Yakıtların yoğunluk, viskozite, ısıl değer ve setan sayıları incelenmiştir. İncelenen yakıt özelliklerine göre, biyodizelin ve üçlü karışımlarının dizel yakıtı ile yoğunluk ve viskozite yönünden yakın olduğu ancak ısıl değer bakımından düşük olduğu kaydedilmiştir. Bitkisel yağ, n-bütanol ve dizel yakıtı üçlü karışımlarının yoğunluk, viskozite, ısıl değer ve setan sayısı bakımından biyodizele göre dizel yakıtına daha yakın değerde olduğu belirtilmiştir.

Weerachanchai ve diğ. [95] bitkisel yağ, dizel yakıtı ve alkol üçlü karışımlarının yakıt özelliklerini ve faz davranışlarını incelemiştir. Bitkisel yağların yüksek viskoziteleri ve kısa zincirli yapısında oksijen bulunması nedeniyle dizel motorlarında doğrudan kullanımında aşındırıcı etki başta olmak üzere çeşitli dezavantajlarının olduğu vurgulanmıştır. Bitkisel yağların dizel yakıtı ile karışımlarında ise bitkisel yağın yapısında yüksek miktarda bulunan asit, fenol, eter, keton, aldehit ve ester gibi polar bileşenlerin dizel yakıtının yapısında bulunan parafin, nafta ve aromatik gibi apolar yapıdaki bileşenler ile tam olarak karışmadığı belirtilmiştir. Bundan dolayı bitkisel yağ ile dizel yakıtı karışımında homojen bir faz oluşturmak için bir katkı maddesinin kullanılması gerektiği ve kullanılacak katkı maddesinin bitkisel yağ ile dizel yakıtı karışımını uzun süre kararlı halde tutacak ortak çözücü özelliğinin de olması gerektiği vurgulanmıştır. Yenilenebilir alternatif bir yakıt olan alkollerin hem dizel yakıtı hem de bitkisel yağlar ile karışabildiği ancak karışımdaki alkolün bir süre sonra faz ayrışması gerçekleştirmemesi gerektiği belirtilmiştir. Alkollerin bitkisel yağ ve dizel yakıtı ile üçlü karışımlarında faz kararlılığını sağlayarak bazı olumsuz özelliklerin yok edilmesinde etkili olduğu belirtilmiş ancak konvansiyonel bir yakıt olarak kullanım noktasında üçlü karışım uygulamalarını içeren çalışmaların az olduğu vurgulanmıştır. Bu maksatla yapılan

çalışmada bitkisel yağ çeşidi olarak yüksek ısı değere sahip, düşük asit özelliği gösteren ve bölgesel üretilen diğer yağlara göre önem arz eden palmye yağı, alkol çeşidi olarak yenilenebilir kaynaklardan üretilen %99,8 saflıkta etanol ve %98 saflıkta n-bütanol kullanılmıştır. Yapılan deneysel çalışmada öncelikle ikili karışımlar hazırlanarak üçüncü bileşen ikili karışıma homojen bir görünüm (tek faz) elde edilene kadar ilave edilmiş ve 3000 d/dk.'da 20 dk. süreyle karıştırılmıştır. Homojen karışım elde edildikten sonra üçlü karışımların oda sıcaklığındaki faz davranışı faz diyagramına çizilmiştir. Karışımların yakıt özellikleri Kay Mixing, Grunberg Nissan eşitliği ve Andrade eşitliği yardımıyla tahmin edilmiştir.

Deney sonuçlarına göre, bitkisel yağ ile dizel yakıtı karışımları her karışım oranında homojen bir faz vermemiş ancak bitkisel yağ karışım oranının %10'dan daha az olması durumunda faz kararlılığının olabildiği belirtilmiştir. Bitkisel yağ etanol ve n-bütanol içerisinde tamamen çözünmektedir. Etanol ile dizel yakıtı karışımları için etanol karışım oranı %10'dan az ya da %88'den fazla olması durumunda karışımın tek faz olduğu vurgulanmıştır. Ancak uzun karbon zincirine sahip olan n-bütanolün her oranda dizel yakıtı ile karışabildiği kaydedilmiştir. Üçlü faz diyagramına göre n-bütanol kullanılan karışım diyagramındaki çözünme alanı etanol karışımı içeren diyagramdan daha fazla olduğu belirtilmiştir. Üçlü karışımda n-bütanol kullanılması durumunda dizel yakıtı miktarının arttığı ancak etanol karışımlarında bu oranın %12,8'den düşük olduğu ve benzer şekilde bitkisel yağ oranının da artmasıyla tek faz için karışımdaki alkol oranının da arttığı vurgulanmıştır. Buna göre üçlü karışımın faz kararlılığı için alkol çeşidinin belirleyici bir özellik olduğu belirtilmiştir.

Wagner ve diğ. [96] atık soya yağı ile dizel yakıtı karışımlarının araç performansına etkilerini incelemişlerdir. Bitkisel yağ ile dizel yakıtı karışımlarının dizel motorlarda alternatif yakıt olarak kullanılmasının dizel yakıtı kullanımını azaltacağı vurgulanmıştır. Yapılan çalışmada bitkisel yağ, dizel yakıtı ve kerosen ile oluşturulan üçlü karışımlarından viskozite ve araç performansı dikkate alınarak optimum karışımın belirlenmesi amaçlanmıştır. Çalışmada kullanılan karışımlar kış şartları için hacimsel olarak %15 soya, %40 dizel ve %45 kerosen (VD15), 0 °C ve üzeri sıcaklık için %30 soya, %35 dizel ve %35 kerosen (VD30), %30 soya ve %70 dizel (VD30-2), 15 °C ve üzeri sıcaklık için %40 soya, %28 dizel ve %32 kerosen

(VD40), maksimum bitkisel yağ kullanmak için %50 soya %50 kerosen (VD50) ile karıştırılarak deney yakıtları hazırlanmıştır. Deneyler, yakıt karışımlarının viskozitesini belirli bir değerde tutmak için yakıt hattına ısıtıcı bağlanan, 2006 model jeep liberty CRD, 1999 model mercedes E300 ve 1984 model mercedes 300TD araçlarında şasi dinamometresinde ve gerçek yol şartlarında gerçekleştirilmiştir.

Deney sonuçlarına göre, motor performansında soya yağının %15 ile %40 arasındaki karışımlarında dizel yakıtı ile karşılaştırıldığında %1,1 azalma kaydedilmiştir. Motor performansındaki en çok azalma ise VD50 karışımında %4,7 ile %6,4 arasında gerçekleşmiştir. Jeep ve 1984 model mercedes araçlarında dizel yakıtı karışım oranı en fazla olan VD30-2 karışımında en iyi performans elde edilmiştir. Kerosen ilave edilen VD30 yakıtında ise azalma kaydedilmiştir. Yapılan çalışmanın devamında laboratuvar ortamında yapılacak çalışmalarda egzoz emisyonu ve yakıt özelliklerinin incelenmesinin önemli olduğu vurgulanmıştır. Ayrıca, literatür kaynak gösterilerek, bitkisel yağların viskozitelerini azaltmada dizel yakıtı ve kerosen yerine n-bütanol ile dietil eter gibi çözücülerin çok iyi bir şekilde kullanıldığı belirtilmiştir.

Labeckas ve diğ. [97] etanol, petrol ve kolza yağı üçlü kaşımı ile çalışan direkt püskürtmeli dizel motorunun performansını incelemişlerdir. Çevresel yönden dost ve yenilenebilir olan ve biyodizele göre üretim aşaması kolay, fiyatı ucuz olan kolza yağının alternatif yakıt olarak kullanılmasında sorun olan yüksek viskozitenin azaltılması gerektiği belirtilmiştir. Bu problemi gidermek için etanol ile kolza yağı petrol ile kolza yağı ve etanol, petrol ve kolza yağı üçlü karışımlarının kullanılabilceği belirtilmiştir. Deney yakıtı olarak sırasıyla, %97,5 kolza yağı ile %2,5 etanol (ERO2,5), %5 etanol (ERO5), %7,5 etanol (ERO7,5), %10 etanol (ERO10) karışımları ile 97.5% kolza yağı ve 2.5% petrol (PRO2.5), %5 petrol (PRO5), %7,5 petrol (PRO7,5), %10 petrol (PRO10) yakıt karışımları ile etanol ve petrol oranı yarı yarıya olmak üzere %2,5 kolza yağı (EPRO2,5) %5 kolza yağı (EPRO5) ve %7,5 kolza yağı (EPRO7,5) karışımları hazırlanmıştır. Deneyler elektrikli dinamometrede, dört silindirli, direkt püskürtmeli, su soğutmalı belarus D-243 motorunda 25° püskürtme avansında sırasıyla 1400, 1600, 1800, 2000 ve 2200 d/dk.'da gerçekleştirilmiştir.

Deney sonuçlarına göre, kolza yağı, etanol ve petrol üçlü karışımlarının viskozitelerinde azalma kaydedilmiştir. Ortalama efektif basınç değerinde biyoyakıt kullanım oranına bağlı olarak artış kaydedilmiştir. Özgül yakıt tüketiminde 1400 d/dk.'da ERO_{2,5} karışımında %3,5, PRO_{2,5} karışımında %2,9, 1800 d/dk.'da PRO_{2,5} karışımında %5,5 ve EPRO_{2,5-7,5} karışımında sırasıyla %4,7 ve %3,7 azalma kaydedilmiştir. ERO_{2,5}, PRO_{2,5} ve EPRO_{5-7,5} karışımlarında en iyi sonuçların alındığını ve uzun süreli kullanımlar için dayanıklılık testlerinin yapılması gerektiği belirtilmiştir.

Qi ve diğ. [98] kolza yağı, dizel yakıtı, etanol ve katkı maddesi olarak n-bütanol ilave edilerek oluşturulan mikroemülsiyonun direkt püskürtmeli bir dizel motorundaki yanma ve emisyon karakteristiklerine etkilerini incelemişlerdir. Bitkisel yağ ve etanolün ile dizel yakıtı karışımlarında belirli bir karışım oranının üstündeki bitkisel yağ ve etanolün sıcaklığa bağlı olarak bir süre sonra ayrıştığı bu ayrışmayı engellemek için katkı maddesi kullanılması gerektiği belirtilmiştir. Mikroemülsiyon veya hibrid yakıtların düşük sıcaklıklarda kararlı bir faz sergilemesi ve berrak bir görünüme sahip olması gerektiği de vurgulanmıştır. Kolza yağı, dizel yakıtı ve etanol üç bileşenli karışımın faz kararlılığını sağlamak için katkı maddesi olarak bu üç bileşenle çok iyi karışabilen n-bütanol kullanılmıştır. Deney yakıtı olarak %20 karışım oranında kolza yağı ile dizel yakıtı karışımı, üçüncü bileşen olarak sırasıyla %10, %20 ve %30 karışım oranında etanol ile karıştırılmıştır. Bu dört karışımında faz ayrışması gerçekleştikten sonra karışımlar titrasyon yöntemi kullanılarak üç bileşen için ortak çözücü olan n-bütanol ile faz kararlılığı sağlanana kadar titre edilmiş ve karışımların katkı madde ilaveli yeni karışım konsantrasyonları belirlenmiştir. Deneyle iki silindirli, su soğutmalı, direkt püskürtmeli motorda 1500 ve 1800 d/dk.'da farklı yük şartlarında gerçekleştirilmiştir.

Deney sonuçlarına göre, mikroemülsiyon içindeki %30'a kadar olan etanol karışım oranında yoğunluk ve viskozitede azalma kaydedilmiştir. Dizele göre yanma daha geç başlamış en yüksek silindir basıncı, basınç artış hızı ve ısı salımı gerçekleşmiştir. Düşük yükte yanma süresi çok az kısa, yüksek yükte ise dizel yakıtı ile yakın değerlerde tespit edilmiştir. Özgül yakıt tüketiminde çok az artış gerçekleşirken özgül enerji tüketimi aynı değerlerde kaydedilmiştir. Duman emisyonunda önemli derecede düşüş, NO_x emisyonunda ise düşük yükte çok az

düşüş gerçekleşmiştir. Üçlü karışımın faz kararlılığı sağlandıktan sonra motorda herhangi bir değişiklik yapmadan kullanılabilceği vurgulanmıştır.

Atmanlı ve diğ. [99] dizel yakıtı, pamuk yağı ve n-bütanol üçlü karışımlarının faz kararlılıklarını, motor performansı ve emisyonlarını incelemiştir. Bitkisel yağların viskozitesini azaltma yöntemlerinden biri olan ve en çok kullanılan transesterifikasyon yönteminde üretim sürecinde ortaya çıkan gliserinin saflaştırılmasının ilave maliyeti ve biyodizelin düşük sıcaklıklarda yakıt özelliklerinden kaynaklanan olumsuzlukları gidermek için dizel yakıtı, nötr bitkisel yağ ve alkol üçlü karışımı kullanılmasının etkili olacağı ancak bu konuda yapılan fazla sayıda çalışma olmadığı vurgulanmıştır. Bu maksatla yapılan çalışmada yakıt olarak dizel yakıtı ile birlikte, Türkiye’de çok miktarda üretilen pamuk yağı ve alkoller arasında yakıt özellikleri bakımından metanol ve etanole göre daha iyi özelliklere sahip, bitkisel yağlar ve dizel yakıtı ile her oranda çok iyi karışabilen alkol olarak n-bütanol kullanılmıştır. Dizel motorunda kullanılacak yakıtın geniş bir sıcaklık aralığında faz kararlılığını sağlaması ve berrak bir görünüme sahip olması gerektiği vurgulanmıştır. Tasarlanan üçlü karışımın düşük sıcaklıklarda kararlı bir faza sergilemesi için üç bileşenin oda sıcaklığı, 5 °C, 0 °C, -5 °C ve -10 °C olmak üzere beş farklı sıcaklıktaki çözünürlük ilişkileri titrasyon yöntemi kullanılarak incelenmiştir. Bu sıcaklıklar için titrasyon sonucu elde edilen karışım yüzdeleri yardımıyla üçgen faz diyagramları çizilerek çözünür alanlar belirlenmiştir. En düşük sıcaklık değeri olan -10 °C sıcaklığa ait diyagramdaki faz ayrışmasının gerçekleşmediği alan içerisinde %70 dizel yakıtı, %20 pamuk yağı ve %10 n-bütanol konsantrasyonu (DCtOnB) seçilerek dört silindirli, turbosarjlı, direkt püskürtmeli land rover motorunda tam yük değişik devir test prosedürüne göre gerçekleştirilmiştir.

Deney sonuçlarına göre, moment değerlerinde ortalama %2,6, güçte %1,6, ısı veriminde %31,2, ortamla efektif basınçta %2,3, egzoz gaz sıcaklığında %3,6 düşüş, özgül yakıt tüketiminde ise %34,1 artış kaydedilmiştir. CO ve CO₂ emisyonlarında özellikle düşük motor hızlarında düşüş gerçekleşirken, NO_x ve HC emisyonlarında ise artış gerçekleşmiştir. DCtOnB yakıtının düşük sıcaklıkta sergilediği yakıt özellikleri ve egzoz emisyonları azaltması bakımından uygun bir yakıt olduğu vurgulanmıştır.

2.4 Deneysel Tasarım

Ganapathy ve diğ. [100] jatropha yağı biyodizelinin bir dizel motorundaki performansını taguchi metodu kullanarak optimize etmişlerdir. Dizel motorlar için alternatif yakıt olan biyodizelin motorda doğrudan kullanılmasına rağmen optimum motor performans ve egzoz emisyon parametrelerinin belirlenmesinin önemli olduğu vurgulanmıştır. Optimum çalışma parametrelerinin belirlenmesinde deney maliyetlerini azaltmak ve enerjiyi verimli kullanmak için istatistiksel yöntemlere dayalı tek taraflı metod, yanıt yüzey yöntemi, yapay sinir ağları, genetik algoritma ve taguchi gibi metodların kullanıldığı belirtilmiştir. İçten yanmalı motorların optimum çalışma koşulları için yapılacak optimizasyon çalışmalarında bu metodların kullanılması için öncelikle yapılacak deneysel çalışmanın tasarlanmasının önemli olduğu vurgulanmıştır. Bu maksatla yapılan çalışmada taguchi metodu ve ANOVA varyans analizi kullanılarak motor performansının optimizasyonu yapılmıştır.

Saravanan ve diğ. [101] bir dizel motorundaki NO_x emisyonunu azaltmak için taguchi metoduyla püskürtme zamanı, püskürtme basıncı ve EGR oranının optimizasyonunu incelemişlerdir. Dizel motorların yaydığı emisyonlar arasında önemli bir yer tutan NO_x emisyonunu azaltmak için motor sistemleri üzerinde püskürtme basıncı, püskürtme zamanı ve EGR oranı gibi çeşitli ayarların yapıldığı vurgulanmıştır. Taguchi metodu kullanılarak bu üç parametre girdi faktörü olarak, NO_x, duman emisyonu ve ısı verim ise çıktı parametresi olarak belirlenmiş ve deney tasarımı yapılmıştır. Girdi faktörlerinde üç değişik kombinasyon belirlenmiş ve bu kombinasyonların elektrikli dinamometrede, direkt püskürtmeli, hava soğutmalı, EGR sistemine sahip kirloskar marka dizel motorunda deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deney sonuçlarına göre optimizasyon yapılmıştır. Optimizasyondan elde edilen parametreler için ise doğrulama deneyi yapılarak sonuçlar ANOVA analiz yöntemi kullanılarak analiz edilmiştir.

Ismail ve diğ. [102] yapay sinir ağları yöntemini kullanarak motor devri, momentu, yakıt türü ve yakıt akış hızı gibi girdi parametreleri ile CO, HC, NO, maksimum silindir basıncı, ısı salımı gibi parametreleri tahmin etmiş ve bu parametrelerin optimizasyonunu incelemişlerdir. Deney yakıtı olarak dizel yakıtı ile birlikte soya, palmye ve hindistan cevizi yağı metil esterlerinin çeşitli karışımları,

deney motoru olarak ise tek silindirli bir dizel motoru kullanılmıştır. Deney tasarımında girdi parametrelerine göre çıktı parametreleri seçilmiş ve oluşturulan modele göre matlab programında yapay sinir ağı yöntemi kullanılarak girdiler ile çıktılar arasındaki en ideal ilişki belirlenmiştir. Yapılan çalışmada kullanılan yöntem ile deney sayısı azaltılmış ve çıktı parametreleri için en uygun model geliştirilmiştir. Deney tasarımı metodu kullanılarak yapılan çalışmalar yardımıyla otomotiv endüstrisinde motorların geliştirilmesi için harcanan zaman ve maliyetin azaltılabileceği vurgulanmıştır.

İleri ve diğ. [103] yanıt yüzey yöntemini kullanarak enjeksiyon zamanı ve motor devri girdi parametreleri ile moment, güç, özgül yakıt tüketimi, ortalama efektif basınç, efektif verim, egzoz gaz sıcaklığı, NO_x, CO, CO₂, O₂ emisyonu gibi çıktı parametrelerini bir dizel motorunda kanola yağı metil esteri kullanarak tahmin etmişlerdir. Motor performansı ve emisyonlarını belirlemek amacıyla çok sayıda deneyin yapıldığı ve bu deneylerin uzun zamana ve yüksek maliyete neden olduğu vurgulanmıştır. Deney tasarımı metodunun kullanıldığı yöntemlerden biri olan yanıt yüzey yöntemi ile az sayıda deney yardımıyla tahminleme ve çok değişkenli optimizasyonun yapılabildiği vurgulanmıştır. Deney yakıtı olarak dizel yakıtı ile kanola yağı metil esteri, deney motoru olarak ise dört silindirli, su soğutmalı, land rover TDI 110 marka dizel motoru kullanılmıştır. Deney tasarımına göre sırasıyla üç farklı püskürtme zamanı ve motor devrinde deneyler gerçekleştirilmiştir. Yapılan deneyler sonucunda girdi parametreleri ile çıktılar arasındaki ilişki %95 güven aralığında matematiksel olarak belirlenerek çıktı değerleri için bir model geliştirilmiş ve bu modelde değişik girdi değerlerine göre çıktılar elde edilmiştir. Bu çıktıların doğrulama deneyi yapılarak sonuçlar analiz edilmiştir.

Pandian ve diğ. [104] direkt püskürtmeli bir dizel motorunda püskürtme zamanı, püskürtme basıncı ve enjektör nozul uzunluğunun motor performansı ve emisyonlarına etkilerini yanıt yüzey yöntemini kullanarak incelemişlerdir. İçten yanmalı motorlarda optimum çalışma parametrelerinin belirlenmesi için yapılan deneylerde zaman ve maliyeti azaltma açısından kullanılan en etkili yöntemlerden birinin yanıt yüzey yöntemi olduğu ve bu yöntemde de ilk adımın deney tasarımı olduğu belirtilmiştir. Deney tasarımında girdi faktörü olarak püskürtme basıncı, püskürtme zamanı ve enjektör nozul uzunluğu, çıktı faktörü olarak ise özgül yakıt

tüketimi, ısıl verim, CO, HC ve NO_x emisyonları belirlenmiştir. Deney motoru için en ideal girdi değerlerinin belirlenmesi için değişik kombinasyonlarda deneyler yapılmıştır. Deney yakıtı olarak %40 oranında pongamia yağı metil esteri ile dizel yakıtı karışımı kullanılmıştır. Deneyler iki silindirli, su soğutmalı, direkt püskürtmeli bir dizel motorunda 5 kW güç ve %80 yük konumunda en ekonomik devri olan 1500 d/dk.'da gerçekleştirilmiştir. Deney sonuçlarına göre girdi parametreleri esas alınarak her bir çıktı değeri için matematiksel model geliştirilmiş ve modelin doğruluğu için R² değerleri incelenmiştir. Matematiksel modelden elde edilen R² değerleri kontrol edilebilen girdi faktörlerinin çıktılar üzerindeki yüzdesel ifadesi olarak tanımlanmıştır. Matematiksel modelin doğruluğu kabul edildikten sonra arzu edilen çıktılar için girdilerin en ideal seviyesinin belirlenmesi amacıyla optimizasyonu yapılmıştır. İstenilen çıktı parametrelerine göre en düşük NO_x emisyonunu sağlayan ancak motor performansında ve diğer emisyonlarda da çok büyük farklar olmayacak şekilde optimizasyon yapılarak enjeksiyon sistem parametreleri belirlenmiştir.

Tsai ve diğ. [105] yanıt yüzey yöntemini kullanarak bir dizel motorunda dizel yakıtı ile etanol karışımları kullanılmasının motor performansı ve emisyonlarına etkilerini incelemiştir. Dizel motorlarda optimum çalışma parametrelerinin belirlenmesinin motor performansı ve emisyonları için önemli olduğu vurgulanmıştır. Bu maksatla yapılan çalışmada istatistiksel yöntemler arasında etkili yöntemlerden biri olan yanıt yüzey yöntemi kullanılarak deney tasarımı yapılmıştır. Deney tasarımında %2 biyodizel ilave edilmiş dizel yakıtına belirlenen oranlarda etanol ile karıştırılarak deney yakıtları hazırlanmıştır. Bu yakıtlardaki etanol karışım oranı, motor devri ve gaz keleşi pozisyonu girdi faktörü olarak, özgül yakıt tüketimi, CO ve NO_x emisyonları ise çıktı faktörü olarak tanımlanmıştır. Deneyler tek silindirli, hava soğutmalı bir dizel motorunda gerçekleştirilmiştir. Deney sonuçlarına göre, girdiler ile çıktılar arasındaki ilişkiyi gösteren bir matematiksel model geliştirilmiş ve bu model kullanılarak çıktılar tahmin edilmiştir. Deney sonuçları matematiksel modele göre çizilen üç boyutlu grafik üzerinden analiz edilmiştir.

3. BİYOKÜTLE ENERJİSİ VE BİYOPYAKITLAR

Yenilenebilir enerji kaynakları, biyokütle enerjisi, rüzgar enerjisi, güneş enerjisi, hidrojen enerjisi ve hidrolik enerji, jeotermal enerji, dalga enerjisinden oluşan su gücü enerjileri ile füzyon enerjisi olmak üzere sınıflandırılmaktadır [1,18]. Yenilenebilir enerji kaynakları, miktarlarının sınırlı olmaması, çevreye daha az zarar vermeleri ve güvenli olmaları nedeniyle fosil enerji kaynaklarından daha avantajlıdır. Yenilenebilir enerji kaynaklarından olan biyokütle enerjisi, çevre dostu ve yerli kaynak olarak değer kazanan önemli bir enerji kaynağıdır.

3.1 Biyokütle Enerjisi

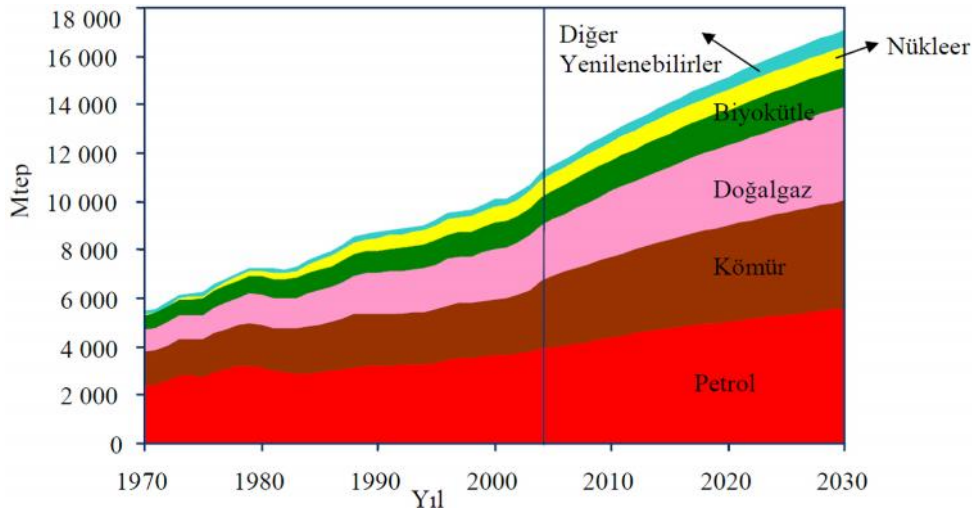
Biyokütle biyolojik kökenli, fosil olmayan organik madde kütesidir. Ana bileşenleri karbonhidrat bileşikler olan bitkisel ve hayvansal kökenli tüm organik maddeler biyokütle enerji kaynağı, bu kaynaklardan elde edilen enerji ise biyokütle enerjisi olarak tanımlanmaktadır [106]. Biyokütle ayrıca bitkiler, ağaçlar ve tarım bitkilerinin oluşturduğu bütün organik maddeleri tanımlayan bir terim olarak fotosentez ile güneş enerjisinin toplandığı ve depolandığı ortamlardır.

Biyokütle enerjisi üretimi için kullanılacak başlıca kaynaklar, tarımsal ve hayvansal atıklar, organik içerikli evsel, kentsel ve endüstriyel atık/atık sular, biyolojik arıtma çamurları, enerji bitkileri, klasik ormanlar, enerji ormanları, sucul ekosistemlerde yetişen alg ve yosun gibi canlılardır [107].

Biyokütlenin içinde, fosil yakıtlarda bulunan kanserojen madde ve kükürt bulunmamaktadır. Bu sebeple çevreye verebileceği zarar son derece az olmaktadır. Biyokütle, diğer yenilenebilir enerji çeşitleri ile karşılaştırıldığında çok önemli özelliklere sahiptir. Katı, sıvı ve gaz gibi çeşitli formlarda bulunabilir ve böylece ısı, elektrik ve mekanik enerji üretiminde kullanılabilir. Biyokütle enerjisi dünyada, ısınma, yakıt üretme ve elektrik üretmek amacıyla kullanılmaktadır. Biyokütle enerjisi, klasik biyokütle kaynakları ve modern biyokütle kaynakları olmak üzere iki çeşittir.

Dünya enerji konseyi raporlarında yeni ve yenilenebilir enerji kaynaklarıyla enerji talebinin, maksimum %8 ile %12'sinin 2020 yılında karşılanabileceği belirtilmektedir. 2030 yılına kadar dünya birincil enerji talebinde fosil enerji kaynaklarının payının %85, yenilenebilir enerji payının ise %15 civarında olacağı öngörülmüştür [9].

Bu senaryoya göre modern biyokütle ile sağlanacak enerji, jeotermal enerjinin 6,4 katı, rüzgar enerjisinin 2,6 ile 3 katı ve güneş enerjisinin ise 1,6 ile 2,2 katı olabileceği öngörülmektedir [2,8,9]. Referans senaryoya göre dünya enerji talebi ve enerji kaynakları Şekil 3.1'de gösterilmektedir [9].



Şekil 3.1: Dünya enerji talebi ve enerji kaynakları

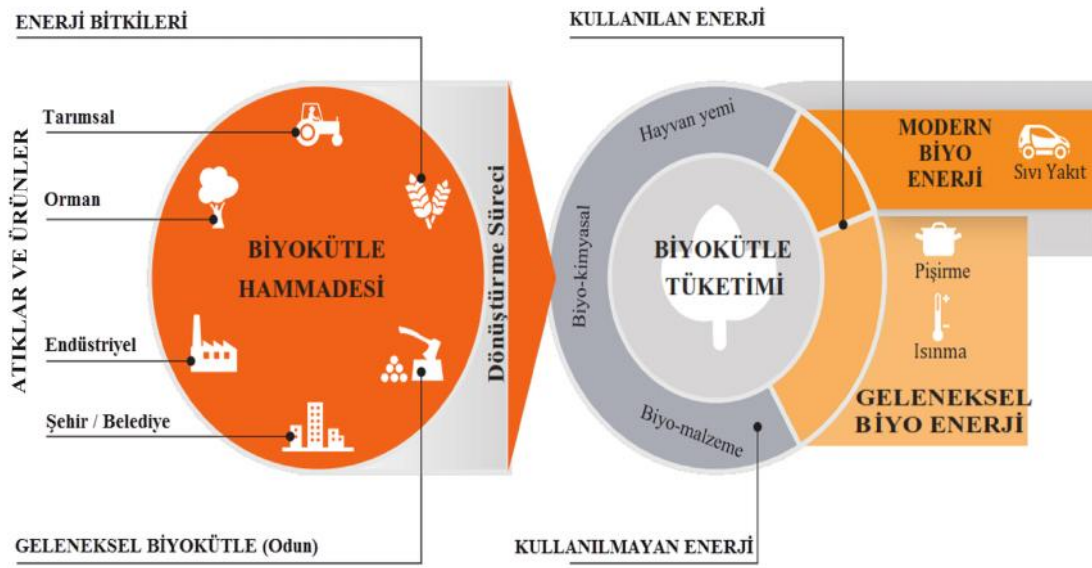
Bu durum modern biyokütlenin, yenilenebilir enerji kaynakları arasında en önemli teknik potansiyele sahip stratejik enerji kaynaklarından biri olduğunu göstermektedir.

Klasik biyokütle enerjisi, ormanlardan elde edilen odun ve yakacak olarak kullanılan bitki ve hayvan atıklarından oluşur. Klasik biyokütle enerjisi, diğer enerji kaynaklarının yetersiz olduğu bölgelerde, ilkelden gelişmişe kadar kullanılabilen doğrudan yakma teknikleriyle elde edilen enerjidir. Bu tip biyokütle genellikle pişirme ve ısıtma amaçlı kullanılmaktadır.

Modern biyokütle kaynakları ise, enerji bitkileri, ağaç ve orman endüstrisi atıkları, hayvansal atıklar ve kentsel atıklardır. Modern biyokütle kaynakları, sanayi, ulaştırma ve ticaret sektöründe kullanılmaktadırlar.

Biyokütle ya doğrudan yakılır ya da bir takım süreçler sonucunda yakıt kalitesi artırılarak alternatif biyoyakıtlar elde edilerek enerji teknolojisinde değerlendirilmektedir.

Biyokütlenin kullanılması için iki yol vardır. Bunlar, elektrik ve ısı üretimi için biyokütlenin direkt olarak yakılması, karbon monoksit, hidrojen ve metan gibi çeşitli gaz veya etanol, metanol, bütanol, biyoyağ, biyodizel gibi sıvı yakıtlara dönüştürülmesidir. Biyokütlenin hammaddesi ve tüketilmesi Şekil 3.2’de gösterilmektedir [108].

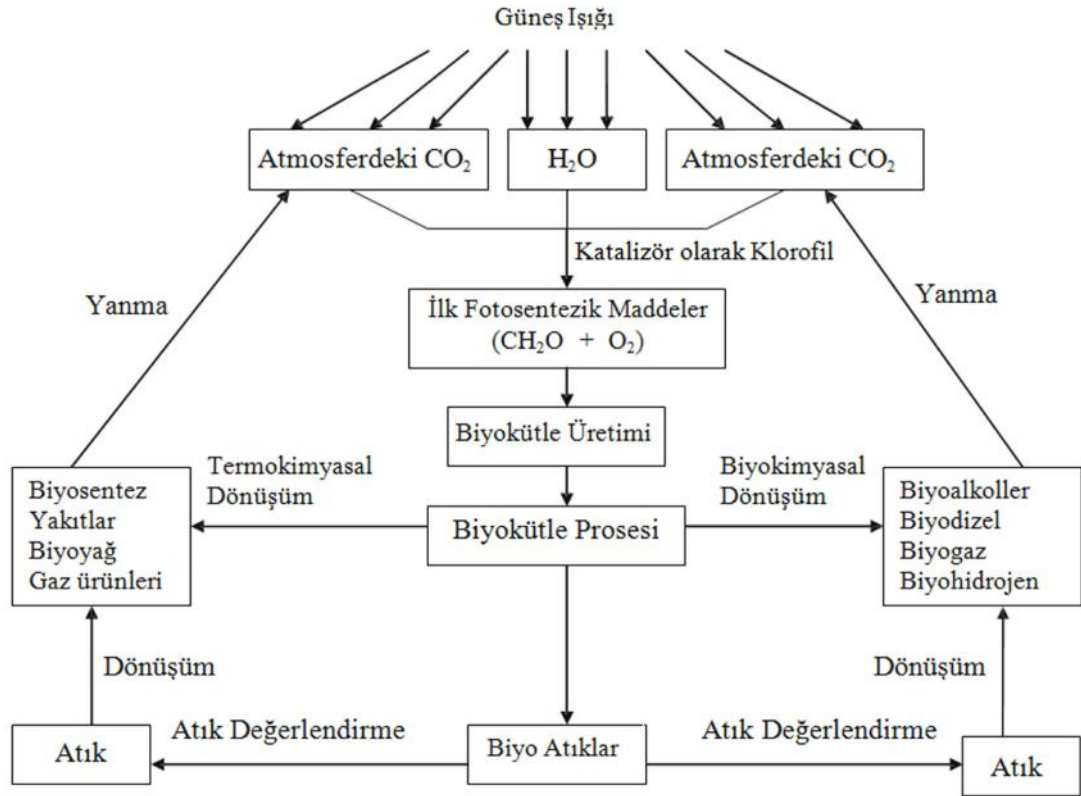


Şekil 3.2: Biyokütlenin hammaddesi ve tüketimi

Dünyanın belli bölgelerinde üretilen petrol, sınırlı rezervlere sahiptir. Petrol fiyatlarındaki ani yükseliş, kaynağının sınırlı olması, özellikle sera gazı ile ilgili çevresel etkilerin insan ve diğer canlıların sağlığına önemli derecede zarar verici seviyeye ulaşması, sağlık ve güvenlik konuları göz önüne alındığında yeni ve yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelmeyi zorunlu hale getirmiştir.

Bu noktada biyokütleden üretilen biyoyakıtlar, her yerde bulunabilen, sosyo-ekonomik gelişme sağlayan, özellikle çevreye zararsız yöntemlerle elektrik üretebilen, taşıtlar için alternatif yakıt kaynağı olabilen stratejik bir enerji kaynağıdır.

Biyokütleden biyoyakıt üretilmesinde, karbon döngüsü, fotosentez ve biyokütle teknolojisinin ana basamakları Şekil 3.3'te gösterilmektedir [1].

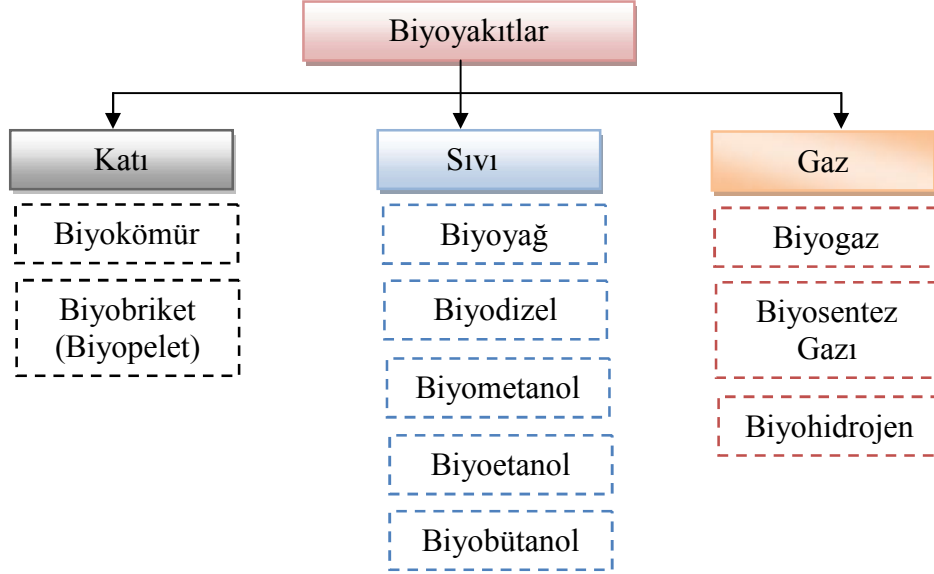


Şekil 3.3: Karbon döngüsü, fotosentez ve biyokütle teknolojisinin ana basamakları

Bitkilerin fotosentezi sırasında kimyasal olarak, özellikle selüloz şeklinde depo edilen ve daha sonra çeşitli şekillerde kullanılabilen bu enerjinin kaynağı güneştir. Organik madde ihtiva eden atıkların mikro-biyolojik yönden değerlendirilmesi, hem çevre kirliliğine yol açmaması, hem de temiz enerji üretimi sağlaması bakımından önem taşımaktadır. Fotosentez ürünleri ile dönüşüm ürünlerinin yakılmasıyla açığa çıkan CO₂, daha önce bu maddelerin oluşması sırasında atmosferden alınmış olduğundan, biyokütleden enerji elde edilmesi sırasında çevre ve iklim CO₂ salımı açısından teorik olarak korunmuş olmaktadır.

3.2 Biyoyakıtlar

Yenilenebilir bir enerji kaynağı olarak biyokütleden elde edilen biyoyakıtlar temiz, çevreye dost ve oldukça verimli bir enerjidir. Biyoyakıtlar katı, sıvı ve gaz yakıt olarak kullanılmaktadır. Biyokütleden elde edilebilen katı, sıvı ve gaz yakıtlar Şekil 3.4'te gösterilmektedir.

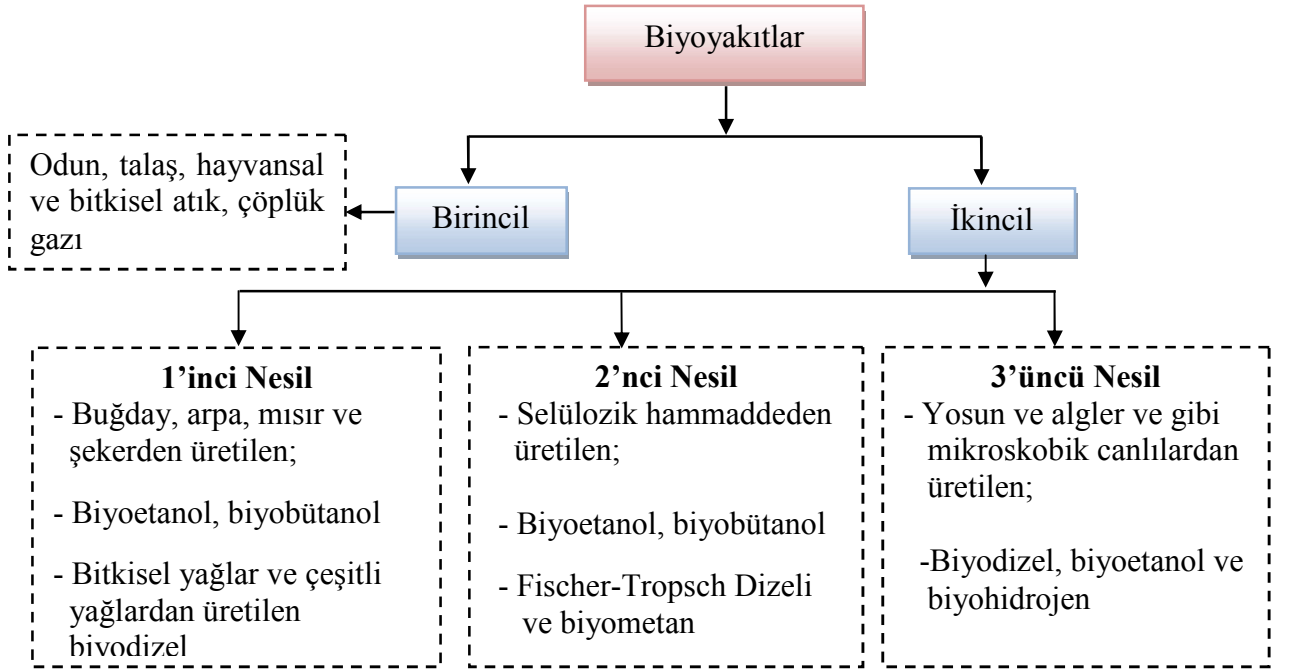


Şekil 3.4: Biyokütleden elde edilebilen katı, sıvı ve gaz yakıtlar

Dünya enerji tüketiminde büyük bir paya sahip olan ulaştırma sektöründe sıvı yakıtlar kullanılmaktadır. Fosil kökenli sıvı yakıtların yerine kullanılacak sıvı biyoyakıtların başında bitkisel yağlar, bu bitkisel yağlardan üretilen biyodizel ve biyokütleden üretilen biyoalkoller gelmektedir. Biyoyakıtlar fosil kökenli yakıtların yerine kullanıldığı için çevre ve ekonomi açısından büyük önem taşımaktadır. Fosil yakıtlar ile ekonomik olarak rekabet edebilir durumda olan biyoyakıtların kullanıldığı etkin biyo enerji dönüşümlerinin kullanımı son yıllarda artma eğilimindedir [1,14].

Çok sayıda gelişmiş ve gelişmekte olan ülkede petrole olan bağımlılığı azaltan, sera gazı emisyon etkisini düşüren ve kırsal alanda gelişmeyi sağlayan biyoyakıtlar için farklı üretim yöntemleri geliştirilmiştir.

Üretim teknolojisine göre birincil ve ikincil olmak üzere iki sınıfa ayrılmıştır. Birincil biyoyakıtlar doğal ve herhangi bir işlem gerektirmeden kullanılan atıklar, hayvansal yağ, odun, ağaç kabuğu gibi kimyasal bir işlem uygulanmadan direk olarak ısınma, pişirme ve elektrik üretiminde kullanılmaktadır. İkincil olan biyoyakıtlar ise birincil olanların iyileştirilmesiyle üretilmektedir. Bunlar bitkisel yağ, biyodizel, etanol, metanol ve biyogaz gibi ürünler olarak sıralanmaktadır. İkincil biyoyakıtlar da kendi içinde üretim yöntemi ve kullanılan hammaddenin kimyasal işlemler yardımıyla dönüşümüne göre 1, 2 ve 3'üncü nesil olmak üzere sınıflandırılmaktadır [17]. Üretim teknolojisine göre biyoyakıtlar Şekil 3.5'te gösterilmektedir.



Şekil 3.5: Üretim teknolojisine göre biyoyakıtlar

İkincil biyoyakıtlar içten yanmalı motorlarda alternatif yakıt olarak doğrudan veya fosil yakıtlarla karıştırılarak kullanılabilir. Ulaştırma sektöründe kullanılan araçlar arasında giderek artan bir sayıya ulaşan dizel motorlu araçların yakıt ihtiyacını karşılamak için bitkisel yağlar, biyodizel ve biyoalkoller ön plana çıkmaktadır.

Günümüzde yaygın olarak kullanılan bu biyoyakıtlar ile ilgili yapılan çalışmalardan elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde, alkollerden metanol üretim

sürecinden dolayı, etanol ise dizel motorlarında dizel yakıtı ile birlikte kullanılması etanolün yakıt özelliklerinden kaynaklanan olumsuzluklar nedeniyle sınırlanmaktadır. Özellikle 10 °C'nin altındaki sıcaklıklarda etanolün dizel motorlarda dizel yakıtı ile karışım oluşturma şeklinde kullanılmasında faz ayrışması gerçekleşmektedir. Bu durum dizel motor yakıt sistemi için istenmeyen sonuçlara neden olmaktadır [37-41].

Biyodizelin de dizel motorlarında doğrudan veya dizel yakıtı ile birlikte kullanılmasında çeşitli olumsuzluklar ortaya çıkmaktadır. Bunlar, biyodizelin üretim maliyetinin yüksek olması, üretimde açığa çıkan gliserini değerli bir ürün haline getirmek için ilave enerjinin harcanması, 0 °C'nin altındaki düşük sıcaklıklarda soğuk akış özelliklerinin olumsuzluk yaratması ve NO_x emisyonunun dizel yakıtına göre artış göstermesi şeklinde sıralanmaktadır. Özellikle 0 °C'nin altındaki düşük sıcaklıklarda biyodizel kristalize olmaktadır ve dizel yakıtı ile karışımlarında faz ayrışması gerçekleşmektedir ve bu kristaller yakıt sistemi parçalarına zarar vererek motorun çalışmasında sorun çıkarmaktadır [16,21,25,32-34].

Bu noktada, bitkisel yağlar ile metanol, etanol haricindeki farklı biyoalkollerin dizel motorlarında dizel yakıtıyla birlikte kullanılmasıyla biyoyakıt olarak kullanılan metanol, etanol ve biyodizelin yarattığı olumsuzlukların giderebileceği değerlendirilmektedir [99].

3.2.1 Bitkisel Yağlar

Dizel yakıtına alternatif olabilecek yakıtlar teknik, ekonomik ve çevresel yönden kabul edilmeli ve hammadde temini kolay olmalıdır [15,16]. Üretim teknolojisinin kolaylığı, çevre dostu olması, dizel motorlu araçlarda mevcut yakıt sistemlerinin değiştirilmesine gerek duyulmaması ve yakıt özellikleri bakımından dizel yakıtına yakın özellikleri ile bitkisel yağlar, biyoyakıtlar içinde öne çıkmaktadır.

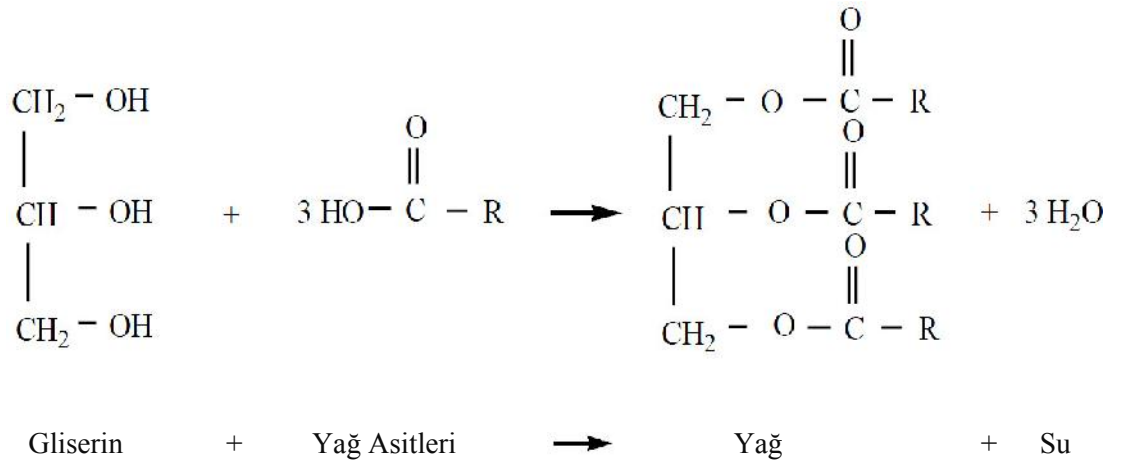
3.2.1.1 Bitkisel Yağların Yapısı

Bitkisel yağlar, bazı tarım ürünlerinin meyve, çekirdek ve tohumlarının işlenmesi sonucunda elde edilmektedir. Bunlar petrol esaslı yağlardan farklı

kimyasal yapıya sahiptirler [106]. Yağlar organik bileşiklerin bir grubunu teşkil ederler. Karbonhidratlarda olduğu gibi yağların kimyasal yapılarına karbon, hidrojen, oksijen elementleri katılmaktadır. Dizel yakıtı büyük oranlarda parafinler ve aromatiklerden oluşmasına karşılık, bitkisel yağlar doymuş ve doymamış yağ asitlerinin gliserinle yapmış olduğu esterlerdir [16]. Yağ asitleri, uzun, düz zincirli ve çift karbonlu monokarboksilli asitlerdir. Bu bileşikler suda çözünmediği halde pek çok organik çözücüde çözünürler ve sudan daha düşük yoğunluğa sahiptirler.

Normal oda sıcaklığında sıvıdan katıya kadar değişen bir erime aralığında bulunabilirler. Oda sıcaklığında katı formda iseler katı yağlar (fats), sıvı formda iseler sıvı yağlar (oils) olarak tanımlanırlar. Yağların katılık veya sıvılık durumu yağların fiziksel özelliğiyle ilgilidir [107,110].

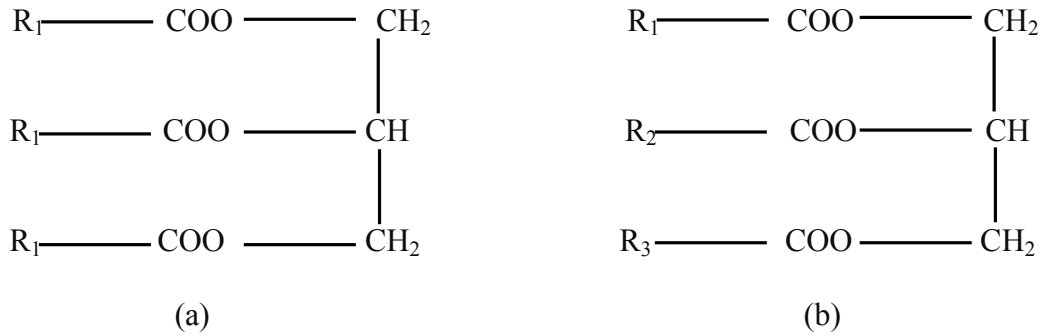
Gliserin molekülünü oluşturan üç alkol grubu yağ asitlerinin esterleşmesi ile trigliserit adını alır. Yağ molekülünün ağırlık olarak %94-96'sını yağ asitleri, %4-6'sını ise gliserin oluşturmaktadır. Yağ asitlerinin gliserinle esterleşmesi Şekil 3.6'da gösterilmektedir [111].



Şekil 3.6: Yağ asitlerinin gliserinle esterleşmesi

Trigliseritler normal yağların %95'lik kısmını oluşturmaktadırlar. %5'lik kısmı ise mono ve digliseritlerden oluşur. Bir trigliserit üç yağ asiti ve gliserinden oluşmaktadır. Bu trigliseritteki yağ asitlerinin tamamı aynı ise basit trigliserit olarak adlandırılır.

Ayrıca, iki ya da üç ayrı yağ asitinden oluşan triglisritlere, karışık triglisrit denmektedir. Şekil 3.7’de basit ve karışık triglisritin yapısı görülmektedir.



Şekil.3.7: Basit ve karışık triglisritin yapısı a) Basit triglisrit, (b) Karışık triglisrit

3.2.1.2 Yağ Asitleri

Yağlar, bitkisel ve hayvansal kaynaklardan değişik yöntemler kullanılarak elde edilmektedir. Bitkisel yağların yağ asidi kompozisyonu bitkinin genetik çeşitliliği, yetiştirildiği mevsim, iklim şartları, toprak tipi gibi koşullara bağlı olarak değişmektedir. Yağ asitlerinin yapısının, yağın fiziksel özelliklerine çok büyük etkisi bulunmaktadır ve yağın kalitesini belirlemektedir.

Yağ asitleri genel olarak çift karbon sayılı, cis konfigürasyonda, dallanmamış ve düz zincirli (asiklik) monokarboksilik asitlerdir. Az olmakla birlikte doğada trans konfigürasyonda (elaidik asit), tek karbon sayılı (propiyonik asit, valerik asit gibi) ve dallanmış yağ asitleri (tüberkülostearik asit veya laktobasillik asit metil grubu ile dallanma gösteren doymuş yağ asitleridir) ile siklik yağ asitleri (hidnokarpik asit ve şolmugrik asit) de bulunmaktadır.

Bir yağın fiziksel ve kimyasal özellikleri yağı oluşturan yağ asitlerinin cinsine bağlıdır. Yağ asitleri $CH_3 (CH_2)_n COOH$ genel formülü ile gösterilir. Bitkisel ve hayvansal yağlarda bulunan en yaygın yağ asitlerinin fiziksel ve kimyasal özellikleri Tablo 3.1’de gösterilmektedir [16,34,107,109,114].

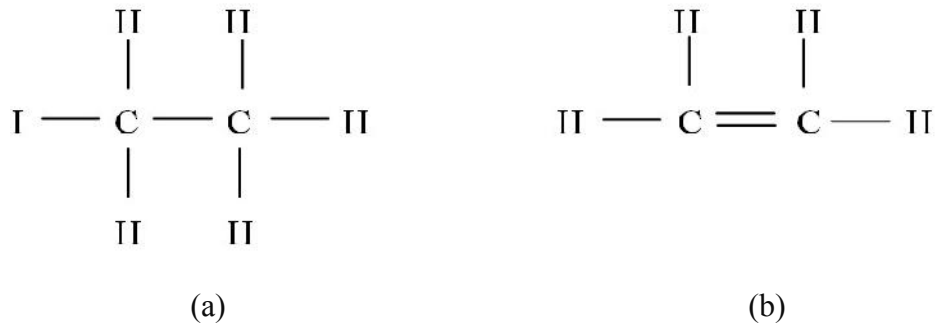
Tablo 3.1: Bitkisel ve hayvansal yağlarda bulunan bazı yağ asitlerinin özellikleri

Yağ asitleri (Sistemik ismi)	Genel formülü	Karbon sayısı: Çift bağ sayısı	Molekül ağırlığı	Erime noktası (°C)
Kaprilik asit (oktanoik asit)	C ₈ H ₁₆ O ₂	C08:0	144,22	25,5
Kaprik asit (dekanoik asit)	C ₁₀ H ₂₀ O ₂	C10:0	172,27	31,5
Laurik asit (dodekanoik asit)	C ₁₂ H ₂₄ O ₂	C12:0	200,32	44,5
Miristik asit (tetradekanoik asit)	C ₁₄ H ₂₈ O ₂	C14:0	228,38	58,5
Palmitik asit (heksadekanoik asit)	C ₁₆ H ₃₂ O ₂	C16:0	256,43	63,5
Stearik asit (oktadekanoik asit)	C ₁₈ H ₃₆ O ₂	C18:0	284,48	71,5
Araşidik asit (eikosanoik asit)	C ₂₀ H ₄₀ O ₂	C20:0	312,51	75,3
Behenik asit (dokosanoik)	C ₂₂ H ₄₄ O ₂	C22:0	340,06	80,5
Oleik asit (9Z-oktadekanoik asit)	C ₁₈ H ₃₄ O ₂	C18:1	282,47	16,5
Linoleik asit (9Z,12Z-oktadekadienoik asit)	C ₁₈ H ₃₂ O ₂	C18:2	280,45	-5
Linolenik asit (9Z,12Z,15Z-oktadekatrienoik)	C ₁₈ H ₃₀ O ₂	C18:3	278,44	-11
Erurik asit (13Z-dokosenoik asit)	C ₂₂ H ₄₂ O ₂	C22:1	338,58	33,9

Yağ asitleri, hidrokarbon zincirindeki bağlara göre doymuş veya doymamış yağ asitleri olmak üzere iki grupta incelenmektedir [1,112].

Doymuş Yağ Asitleri

Karbon-karbon (-C-C) bağları tek bağdan oluşan yağ asitleri, doymuş yağ asitleri olarak isimlendirilir. Doymuş yağ asitlerinin erime ve kaynama noktaları zincir uzunluğu arttıkça artmaktadır ve oda sıcaklığında genelde katıdırlar [1,112,113]. Şekil 3.8'de doymuş ve doymamış yağ asitlerinin yapıları görülmektedir.



Şekil.3.8: Yağ asitleri (a) Doymuş yapı, (b) Doymamış yapı

Laurik asit (C12:0), miristik asit (C14:0), palmitik asit (C16:0), stearik asit (C18:0), araşidik asit (C20:0) ve behenik asit (C22:0) bitkisel yağlarda bulunan en önemli doymuş yağ asitleridir. Özellikle palmitik ve stearik asit bitkisel yağlarda bulunan en yaygın doymuş yağ asitleridir [1,113].

Doymamış Yağ Asitleri

Karbon zinciri üzerinde çeşitli konumlarda, karbon-karbon arasında bir veya daha fazla kovalent çift bağ içeren (C=C) yağ asitleri doymamış yağ asitleri olarak isimlendirilir. Zincir formunda dallanmamış mono karboksilli asitlerin içinde alken asitleri grubuna dâhil olup oda sıcaklığında sıvı haldedirler ve büyük çoğunluğu bitkisel kaynaklıdır [1,112,113].

Doymamış bağların sayısı bir veya daha fazla olabilir ve doymamış yağ asitleri doymuş hale getirilebilir. Sadece tek bir çift bağ içeriyorsa, tekli doymamış yağ asidi, birden fazla sayıda çift bağ içeriyorsa, çoklu doymamış yağ asidi denilmektedir. Çift bağ sayısı arttıkça erime noktası düşmektedir. Doymamış yağ asitleri kolaylıkla okside olabilirler. Özellikle çift bağın sayısının artması oksidasyonu kolaylaştırmaktadır. Metaller, ısı ve ışık oksidasyonu hızlandırmaktadır [112-114]. Oleik asit (C18:1) yapısında bir çift bağ içeren en önemli tekli doymamış yağ asididir.

Yağ Asidinin Yakıt Özelliklerine Etkisi


Bitkisel yağların dizel motor yakıtı olarak kullanılmasında yağ asitlerinin özellikleri etkili olmaktadır. Yağ asitlerinin fiziksel özellikleri, karbon zincirinin uzunluğuna ve moleküldeki çift bağların sayısına bağlıdır. Karbon sayısı düşük olan (10'a kadar) yağ asitleri düşük sıcaklıkta sıvı ve uçucudur. Daha fazla sayıda karbona sahip olanlar (12:0 ve daha büyük zincirli doymuş yağ asitleri) vücut sıcaklığında katıdır. Bunların erime noktaları molekül ağırlığının artması ile yükselmektedir. Bilinen bütün doymamış yağ asitleri oda ısısında sıvıdır. Çift bağ sayısı arttıkça daha düşük derecelerde de sıvı kalabilirler. Doymamış yağ asitleri taşıdıkları çift bağlar sayesinde yüksek reaksiyon yeteneğine sahiptir. Doymamış yağ asitlerinin yapısında yer alan etilen bağı (-CH=CH-) kolaylıkla hidrojenle doyurulabilir [1,112-114].

Yağ asitleri bir motordaki yanma karakteristiklerini de belirlemektedir. Trigliseritlerin doymamışlık oranı yanma kabiliyetini etkilemektedir. Yanma kalitesi doymamışlık oranı ile azalmaktadır. İyot seviyesi doymamış yağ oranı seviyesini belirlemektedir. Doymamış yağ oranı fazla olan yağda iyot değeri yüksek ve setan sayısı düşük olmaktadır. Setan sayısı yakıtın kendiliğinden tutuşabilirliğinin bir ölçüsüdür. Düşük iyot seviyesi iyi bir yanma gerçekleştirir. Ancak çok düşük iyot seviyesi soğukta olumsuz özellik sergilemektedir [31].

Bir sıvı yakıt ışık, hava gibi oksitlenmeyi sağlayan etkilere karşı dayanıklı ve uzun süre depolanmada kararlı olmalıdır. Çift bağ sayısı fazla olan doymamış yağ asitlerinin oksidasyon kararlılıkları zayıftır [1].

Sıvı yakıt soğutulduğunda veya soğuk hava şartlarında, belli bir sıcaklıkta yakıt molekülleri daha büyük sıvı kristalleri oluşturur. Soğutmaya devam edildiğinde daha fazla sıvı kristali oluşur ve tüm yakıt katılaşana kadar kristaller yığılır. Soğuk akış özelliklerinde, kristallerin görülmeye başladığı ve kümeleştiği sıcaklığa bulutlanma noktası, bu kristallerin süzülebilme yeteneklerinin kaybolduğu sıcaklığa filtre tıkanma noktası ve yakıtın akmasının durduğu jelleştiği sıcaklığa ise akma noktası denilmektedir. Biyoyakıtlar için önemli bir parametre olan soğuk akış özellikleri yağın asit kompozisyonundan etkilenmektedir. Yağ asidinin yakıt özelliklerine etkisi Tablo 3.2’de gösterilmektedir [1,106].

Tablo 3.2: Yağ asidinin yakıt özelliklerine etkisi

Yağ asidi yapısı	Çoklu doymamış	Tekli doymamış	Doymuş
İyot sayısı	Yüksek	Orta	Düşük
Setan sayısı	Artış gösterir 		
Isıl değer			
Soğuk akış özelliği			
Oksidasyon kararlılığı			

Doymuş yağlar, doymamış yağlara göre yüksek ısı değerine, viskoziteye, alev alma sıcaklığına, kısa buharlaşma süresine, kısa tutuşma gecikmesine, yüksek

oksidasyon kararlılığına ve çok az birikim oluşturma özelliğine sahiptirler [14-16,31]. Araştırma ve uygulamalar, kimyasal yapı olarak uzun, dallanmış ve tek çift bağlı yağ asitlerini içeren yağların uygun dizel yakıtı alternatifi olduğu ve artan doymamışlık derecesinin setan sayısını olumsuz yönde etkilediğini ortaya koymuştur. Bu durum, oleik asitçe zengin yağları ön plana çıkarmaktadır [23,106,115]. Dizel motorlarda kullanılan bazı yağların yakıt özellikleri Tablo 3.3'te gösterilmektedir [14-16].

Tablo 3.3: Bazı yağların yakıt özellikleri

Yağ	Yoğunluk 20 °C (g/ml)	Viskozite 40 °C (mm ² /s)	Setan sayısı	Isıl değer (MJ/kg)	Bulutlanma noktası (°C)	Parlama noktası (°C)
Pamuk	0,918	32,7	41,8	38,3	-1	243
Ayçiçek	0,925	34,4	37	38,7	-5	316
Soya	0,920	33,1	38	38,3	-4	330
Kanola	0,915	37,3	37,6	38,4	-8	320
Palmiye	0,918	37,5	42	38,2	-9	267

Bitkisel yağların ısıl değerleri, hidrokarbonlarının çift bağ sayısı ve zincir uzunluğuna bağlıdır. Çift bağ sayısı arttıkça ısıl değer azalmakta, zincir uzunluğu arttıkça ısıl değer artmaktadır. Burada ısıl değer artışı karbon ve hidrojen sayılarının oksijen sayılarına oranına bağlıdır ve Bu nedenle bitkisel yağların ısıl değeri dizel yakıtına göre yaklaşık %15 düşüktür [1,14-23].

Bitkisel yağların yoğunluğu doymamış yağ asitleri ve molekül ağırlığı nedeni ile artmaktadır ve bitkisel yağların yoğunluğu dizel yakıtına göre yaklaşık %10 yüksektir. Bitkisel yağlarda viskozite, ısıl değer tersi olacak şekilde çift bağ sayısı arttıkça viskozite düşmektedir. Bununla birlikte zincir uzunluğu arttıkça viskozite artmaktadır. Bitkisel yağların viskozitesi dizel yakıtına göre yaklaşık 10-15 kat daha fazladır. Ayrıca, setan sayısı yaklaşık %25 düşük, bulutlanma ve parlama noktaları ise dizel yakıtına göre yüksektir [1,14-23,34].

Yenilebilir ve Yenilemeyen Bitkisel Yağlar

Dünyada bilinen 350 farklı bitki türü ülkelerin iklimlerine ve toprak durumuna bağlı olarak farklı özelliklerde ve miktarlarda yetişmektedir. Dizel yakıtına alternatif olan bitkisel yağlarda bu özelliklerden etkilenmektedir. Örneğin ABD’de soya, Kanada’da kanola, Avrupa’da ayçiçek ve kanola, Güneydoğu Asya’da (Malezya, Endonezya ve Tayland) palmiye yağı, Filipinler’de hindistan cevizi yağı, Yunanistan ve Türkiye’de ise pamuk yağı ülkelerin iklim ve toprak şartlarına göre üretimi fazla olan bitkilerden elde edilen yağlardır [21,116]. Alternatif yakıt olarak kullanılan bitkisel yağlar yenilebilen ve yenilemeyen olarak iki sınıfta değerlendirilmektedir.

Yenilebilir yağlar; soya, kanola, ayçiçek, palmiye, hindistan cevizi, zeytin, fındık, mısır, susam, aspir, yer fıstığı yağı.

Yenilemeyen yağlar; tütün, pamuk, kauçuk, karanja, jatropha, jojoba, mahua, polanga, castor, cuphea, camelina yağı şeklinde sıralanmaktadır.

Bitkisel yağlar, yakıt özellikleri bakımından dizel yakıtına yakın özellikler sergilemektedir, yenilenebilir kaynaklardan üretilmelerinin yanı sıra çevresel yararları da dikkate alındığında son yıllarda daha giderek önemli olmaya başlamıştır. Yakın gelecekte fosil türevli yakıtların yerini alma potansiyeline sahip olmasına karşın üretilen bitkisel yağların büyük bir bölümünün hem gıda amaçlı kullanılması hem de petrole göre fiyatının yüksek olması, petrole alternatif olmasının önünde engel oluşturmaktadır. Ancak, petrol rezervlerinin azalması ve petrol fiyatlarındaki belirsizlikler nedeniyle doğrudan gıda amaçlı olarak kullanılmayan bitkisel yağların dizel motorlarında kullanılması önem kazanmaktadır.

Türkiye sahip olduğu uygun ekolojik koşullar nedeniyle ayçiçekten sonra önemli bir pamuk üreticisi ülkedir. Üretilen pamuğun tohumundan (çiğit) elde edilen yağ doğrudan gıda amaçlı kullanılmamaktadır. Pamuk yağı gıda amaçlı sadece margarin üretiminde diğer bitkisel yağlara belirli oranlarda karıştırılarak kullanılmaktadır. Pamuk yağı, literatürde yapılan çalışmalarda yenilemeyen yağlar arasında yer almaktadır [21,57,117-121].

3.2.1.3 Pamuk Yağı

Yıllık bir lif bitkisi olan pamuk, lif ile %40 oranındaki tohumdan oluşur ve sıcak iklimlerde suyun bol bulunduğu alanlarda verimli bir şekilde yetişmektedir. Botanikte *Gossypium* olarak adlandırılmaktadır. Pamuk bitkisi büyük çiçeklerden oluşur, tohumu 8-12 mm uzunluğunda, yumurta şeklinde, ince, sert kabuklu, liflidir ve rengi ise kahverengi ile siyah renkleri arasındadır. Tohum ortalama %20 yağ, çekirdeği ise %20-35 yağ ve %40 protein içermektedir [111].

Ham pamuk yağı kendine özgü tadı ve kokusu olan, oldukça koyu renkli (kırmızıkahverengi) bir yağdır (Şekil 3.9). Yoğunluğu 0,918-0,926 g/ml aralığında, iyot sayısı da 90-103 aralığındadır. Pamuk, gerek lifi gerekse çiğidinden elde edilen yağı ve diğer yan ürünleriyle ekonomik değeri çok yüksek olan bir bitkidir. Ülkemizde pamuk yağı genellikle sabun sektöründe ve margarin hammaddesi olarak katı yağ üretiminde kullanılmaktadır [1,50-52,57].



Şekil.3.9: Pamuk bitkisi ve yağı

Pamuk yağının doymamış yağ asitleri içeriğinin (linoleik, oleik) yüksek olmasının yanı sıra, diğer yağlı tohumlarla karşılaştırıldığında, doymuş yağ asitleri (palmitik, stearik) içeriği açısından da en yüksek miktarı içeren yağdır. Pamuk yağında %27 doymuş yağ, %54 doymamış yağ ve %19 tekli doymamış yağ bulunmaktadır. Pamuk yağının yağ asidi kompozisyonu Tablo 3.4'te verilmektedir [34,122,123].

Tablo 3.4: Pamuk yağının yağ asidi kompozisyonu

Yağ asitleri	Karbon sayısı: Çift bağ sayısı	Değer aralığı
Laurik asit	C12:0	0-0,2
Miristik asit	C14:0	0,6-1
Palmitik asit	C16:0	21,4-26,4
Stearik asit	C18:0	2,1-3,3
Araşidik asit	C20:0	0,2-0,5
Behenik asit	C22:0	0-0,6
Lignoserik Asit	C24:0	0-0,1
Palmiteloik asit	C16:1	0-1,2
Oleik asit	C18:1	14,7-21,7
Erurik asit	C22:1	0-0,3
Linoleik asit	C18:2	46,7-58,3
Linolenik asit	C18:3	0-0,4

Pamuk tohumunda bulunan aflatoksin ve gossipol maddeleri yağın yemeklik olarak kullanımını olumsuz yönde etkilemektedir. Genel olarak pamuk tohumları değişik türlere göre %0,13-6,64 oranlarında gossipol içerebilmekle birlikte, ülkemizde yetiştirilen çeşitlerinde %1,12-1,29 oranlarında gossipol bulunmaktadır [57]. Gossipol pamuk tohumunun zararlı bir pigmenti olup yağa koyu bulanık bir renk vermektedir ve zehirli olduğundan dolayı protein konsantresi olarak kullanılmasını sınırlamaktadır. Pamuk yağından gossipolü uzaklaştırmak ve yemeklik olarak kullanılabilme amacı ile gerekli ağartma prosesleri yağın maliyetini artırmaktadır [124].

Pamuk tohumları preslenerek veya önce pres sonra ekstraksiyondan geçirilerek elde edilen koyu renkli hiçbir işleme tabi tutulmamış yağa ham yağ denir. Ham yağın yemeklik yağ olarak kullanılması için rafinasyonda sırasıyla yapışkan maddelerin uzaklaştırılması (degumming), serbest yağ asitlerinin yağdan sabun şeklinde uzaklaştırılması (nötralizasyon), yağdaki renk verici pigmentlerin, kalan fosfolipidlerin, oksidasyon ürünlerinin, iz metallerin ve sabun kalıntılarının alınması (ağartma), koku veren maddelerden ayrılması (deodorizasyon) ve son olarak düşük sıcaklıkta yağda oluşan kristallerin uzaklaştırılması (vinterizasyon) işlemleri uygulanmaktadır.

Bitkisel kaynaklı yağların sabunlaşmayan maddeleri arasında yer alan en önemli bileşen, antioksidan etkisi nedeniyle tokoferollerdir. Ham pamuk yağı doğal tokoferollerce oldukça zengin bir yağdır. Ham pamuk yağı toplam %0,110 oranında tokoferol içerirken, rafine pamuk yağı %0,087-0,095 oranında tokoferol içermektedir. Ham pamuk yağındaki toplam tokoferollerin %0,076'sı α -tokoferol, %0,034'ü ise γ -tokoferoldür. Doğal tokoferoller rafinasyon işlemi sırasında tahrip oldukları için ham pamuk yağının, rafine pamuk yağı ile karşılaştırıldığında oksidasyon stabilitesi daha yüksek olmaktadır [112,122].

3.2.1.4 Pamuk Yağının Üretimi ve Tüketimi

Pamuk bitkisi, yaygın ve zorunlu kullanım alanıyla insanlık açısından, yarattığı katma değer ve istihdam olanaklarıyla da üretici ülkeler açısından büyük ekonomik öneme sahip bir üründür. Pamuk işlenmesi açısından çırçır sanayisinin, lifi ile tekstil sanayisinin, çekirdeği ile yağ ve yem sanayisinin, linteri ile de kâğıt sanayisinin hammaddesi durumundadır. Petrole alternatif olarak pamuğun çekirdeğinden elde edilen yağ, giderek artan miktarda alternatif yakıt üretiminde de hammadde olarak kullanılmaktadır. Bu sayede pamuk, enerji tarımının da bir parçası durumundadır. Ayrıca, nüfus artışı ve yaşam standardının yükselmesi, pamuk bitkisine olan talebi de artırmaktadır. Bu yönleriyle pamuğa olan ihtiyaç, tüm dünyada artış göstermektedir.

Pamuk Yağının Üretimi

Dünyada sınırlı sayıda ülkenin ekolojisi pamuk tarımına el verdiğinden, dünya üzerinde 69 ülkenin yaptığı üretimin %80'ine yakını Türkiye'nin de içinde bulunduğu az sayıda ülke üretmektedir. Türkiye'de 2011-2012 döneminde 410 bin hektar alanda pamuk tarımı yapılmıştır [51].

Uluslararası pamuk danışma kurulu'nun 2005-2012 arası yedi yıllık dönemin verilerine göre dünyada ortalama 33 milyon hektar alanda pamuk ekimi yapıldığı ve bu ekimden ortalama 24 milyon ton lif pamuk elde edilmiştir. Dünyada pamuk üretim alanların en geniş olduğu ülke Hindistan'dır. Ardından sırasıyla Çin, ABD, Pakistan, Özbekistan ve Brezilya gelmektedir.

Dünyada en çok pamuk üreten ilk sekiz ülke sırasıyla Çin, Hindistan, ABD, Pakistan, Brezilya, Avustralya, Özbekistan ve Türkiye'dir. Dünya pamuk üretiminin yaklaşık %3'ü Türkiye'de gerçekleşmektedir. Bu oranın %19'u Ege Bölgesinde (Balıkesir, İzmir, Aydın, Muğla), %25'i Akdeniz Bölgesinde (Adana, Antalya) ve %56'sı Güney Doğu Anadolu Bölgesinde (Şanlıurfa, Gaziantep, Diyarbakır) yetiştirilmektedir. Pamuk üretiminde 2008 yılından sonra Türkiye'de bir düşüş yaşanmış olsada Türkiye ve diğer üretici ülkelerde 2010-2011 döneminden sonra artış gerçekleşmiştir. Dünya pamuk üretimi Tablo 3.5'te gösterilmektedir [51,52,125-127].

Tablo 3.5: Dünya pamuk üretimi (1000 ton-lif)

Ülkeler	2007/08	2008/09	2009/10	2010/11	2011/12(*)
Çin	8,056	7,991	6,967	6,641	7,294
Hindistan	5,225	4,921	5,182	5,748	5,879
ABD	4,182	2,790	2,654	3,942	3,413
Pakistan	1,872	1,894	2,090	1,916	2,264
Brezilya	1,602	1,193	1,187	1,960	1,960
Avustralya	139	327	386	914	1,089
Özbekistan	1,165	1,002	849	893	914
Türkiye	675	457	380	488	500
Diğer	3,144	2,826	2,642	2,855	3,543

(*) Tahmin

1 kg kütlü pamuktan %57 oranında tohum elde edilmektedir ve % 57 oranında tohumdan ise yaklaşık %20 oranında pamuk yağı elde edilmektedir. 2009-2010 yılı verileri dikkate alındığında pamuk yağı dünya genelinde 4,7 milyon ton üretilmiştir ve yıllık üretim miktarı olarak bitkisel yağlar arasında 6'ncı sırada bulunmaktadır. 2008-2009 yılı verilerine göre dünya toplam pamuk yağı üretiminin 2/3'ünü üreten ilk dört ülke sırasıyla %32 ile Çin, %24 ile Hindistan, %8 ile ABD ve %3 ile Türkiye'dir [128].

Pamuk Yağının Tüketimi

Dünyada en çok pamuk tüketen ülkeler, yine en çok üretim payına ve pamuğu işleme kapasitesine sahip olan Çin, Hindistan, ABD, Türkiye gibi ülkelerdir. 2006-2007 döneminde dünya tüketimi en yüksek seviyesine çıkmıştır. 2008 yılında tüm

dünyada pamuk üretim düşüşlerine paralel olarak tüketimde de daralma yaşanmıştır. Son yıllarda pamuk tüketimi ABD, Çin ve büyük bölümü Türkiye'den kaynaklı olmak üzere Avrupa'da gerilemiştir. Dünya pamuk tüketimi Tablo 3.6'da gösterilmektedir [51,52,125-127].

Tablo 3.6: Dünya pamuk tüketimi (1000 ton-lif)

Ülkeler	2007/08	2008/09	2009/10	2010/11	2011/12(*)
Çin	10,886	11,104	9,580	10,886	10,015
Hindistan	3,941	4,050	3,865	4,300	4,583
Pakistan	2,613	2,613	2,449	2,351	2,177
Türkiye	1,589	1,350	1,110	1,263	1,219
Brezilya	996	1,002	914	958	936
ABD	1,074	998	771	773	849
Bangladeş	697	762	827	849	806
Diğer	5,157	4,039	4,503	4,530	4,373

(*) Tahmin

3.2.1.5 Bitkisel Yağların Dizel Motorlarda Kullanılması

Dizel motorlarında alternatif yakıt olarak bitkisel yağların kullanımı ile ilgili dünyada birçok çalışma yapılmaktadır. Bitkisel yağların kullanımı yeni olmamakla birlikte ilk kullanımı 1900'lü yıllara dayanmaktadır. 1900 yılında Paris'te yapılan fuarda Rudolf Diesel tarafından başlangıçta dizel yakıtı ile çalışır şekilde tasarlanan motor üzerinde herhangi bir modifikasyon yapılmadan sadece yer fıstığı yağı ile çalıştırılarak sergilenmiştir. 1920'lerden 1940'lara kadar Avrupa'da ve özellikle Afrika kolonilerinde ayrıca Brezilya, Hindistan ve Çin'de bitkisel yağlar dizel yakıtı olarak kullanılmıştır. 1940'lardan sonra ikinci dünya savaşı sırasında acil durumlarda bitkisel yağlar tekrardan yakıt olarak kullanılmıştır. Bu süreçte Brezilya, dizel yakıtı yerine kullanacağı için ülkesinden pamuk yağı ihraç edilmesini yasaklamıştır.

1970'lerde ve 1980 öncesinde yaşanan küresel enerji krizleri sonrasında ülkeler yerli kaynaklardan yenilenebilir enerji arayışına başlamışlardır. Petrol fiyatlarının yüksek ve rezervlerin sınırlı olması ve çevresel faktörlerden dolayı emisyonlarda yapılan yasal düzenlemeler bitkisel yağlara olan ilgiyi artırmıştır.

Günümüzde ise özellikle gelişmekte olan ülkelerde fosil yakıtların çevreye verdiği zararlı etkileri en aza indirmek ve bu yakıtların kullanımını azaltmak için alternatif yakıt olarak bitkisel yağlar ile ilgili çalışmalar devam etmektedir [15,16]. Bu çalışmaların gerçekleştirildiği ülkelerde bölgenin toprak, iklim koşulları, yağın üretim miktarına ve gıda amaçlı kullanılmamasına göre bazı bitkisel yağlar öne çıkmaktadır. Bu yağlardan;

- Kanola yağı; Kanada, İngiltere, İsveç, Fransa, Almanya, İtalya, Finlandiya ve Rusya'da,
- Soya yağı; ABD, Meksika ve Brezilya'da,
- Akçiçek yağı; İspanya, Fransa ve Rusya'da,
- Pamuk yağı; Yunanistan ve Brezilya'da,
- Palmiye yağı; Malezya, Tayland, Endonezya ve Brezilya'da,
- Jatropha yağı; Hindistan, Çin, Endonezya, Tayland ve Filipinler'de,
- Hindistan cevizi yağı; Tayland ve Filipinler'de biyoyakıt olarak kullanılmaktadır [116].

Ülkeler bölgelerinde öne çıkan bu bitkisel yağların dizel motorlarında alternatif yakıt olarak kullanılması yönünde çalışmalarını devam ettirmektedir. Çalışmaların tamamında, biyoyakıt kullanarak fosil yakıt kullanımını sınırlandırmak, fosil kökenli yakıt ithalat giderlerini azaltmak ve çevresel sürdürülebilirliği sağlamak amaçlanmaktadır. Bu nedenle ülkeler kendilerine özgü yerli kaynaklardan yararlanmaktadırlar. Böylelikle hem bölgesel kalkınma ihtiyaçlarını karşılamış hem de çevresel yönden ileri sürülen yasal zorunlulukları yerine getirmiş olmaktadır.

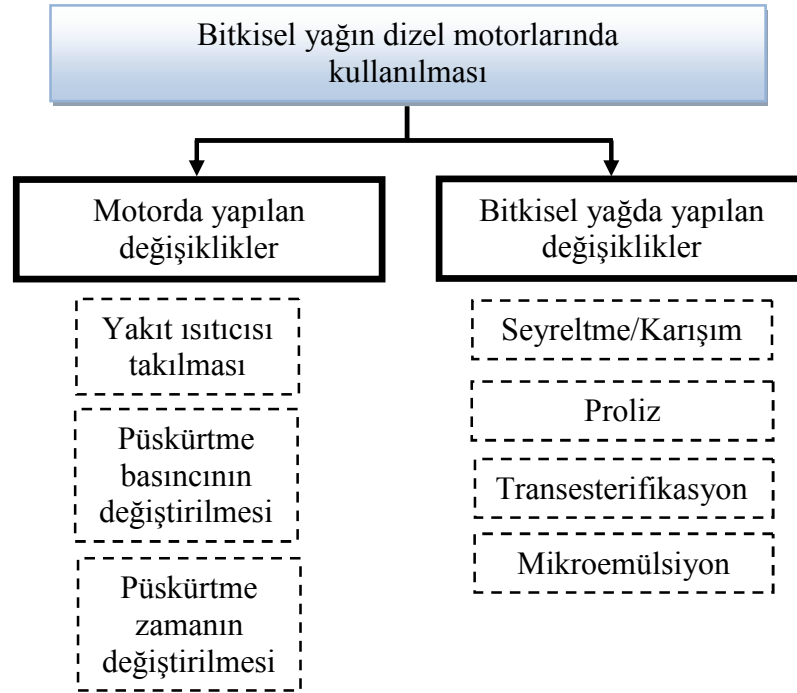
Yapılan çalışmalarda tercih edilen bitkisel yağlardan birisi de pamuk yağıdır. İklim koşulları, ekili alanları ve doğrudan gıda amaçlı kullanılmaması gibi faktörler dikkate alındığında diğer ülkeler gibi Türkiye'de de özellikle pamuk yağının dizel motorlarda alternatif yakıt olarak kullanılmasında öne çıkabileceği değerlendirilmektedir.

Türkiye ile benzer iklime sahip olan Yunanistan'ın tarımsal ekonomisinde büyük bir paya sahip olan pamuk yağı, Avrupa 2003/30/EC yakıt ve emisyon standartlarına göre Yunanistan'da dizel motorlar için alternatif bir enerji kaynağı olarak gösterilmektedir [53,71].

Bitkisel Yağların Dizel Yakıtı Olarak Kullanılmasındaki Yöntemler

Bitkisel yağların dizel yakıtı olarak kullanılması ilgili olarak yapılan çalışmalar, dizel motorlarında hiç bir değişiklik yapılmadan gerçekleştirilmiştir. Bitkisel yağlarla dizel yakıtı arasında yakıt özellikleri bakımından yoğunluk ile alt ısı değerleri arasında fazla fark bulunmamasına rağmen, yapılan çalışmaların tamamında yüksek viskozitenin özellikle enjektörlerde tıkanma, yağlama yağı problemleri, motor ömrünün kısılması gibi olumsuzluklara neden olduğu belirtilmektedir. Ayrıca, bütün bu olumsuz faktörler, motor bakım masraflarını artırıcı ve motorun ömrünü kısaltıcı yönde etki etmektedir.

Bitkisel yağların yakıt olarak kullanılabilmesini sağlamak amacı ile iki yöntem üzerinde çalışmalara ağırlık verilmiştir. Bunlardan biri, bitkisel yağların yakıt özelliklerinin iyileştirilmesi, diğeri de motor ayarlarının değiştirilmesidir. Yakıt özelliklerinin iyileştirilmesi konusundaki çalışmalar, bitkisel yağların viskozitesinin azaltılmasıdır. Bitkisel yağı dizel motorlarda kullanma yöntemleri Şekil 3.10'da gösterilmektedir.



Şekil.3.10: Bitkisel yağı dizel motorlarda kullanma yöntemleri

Bitkisel yağların viskozitesinin azaltılmasında, ısıl ve kimyasal olmak üzere iki yöntem uygulanmaktadır. Isıl yöntemde, yakıt olarak kullanılacak olan bitkisel yağların ön ısıtma ile sıcaklıklarının yükseltilmesi ve dolayısıyla viskozitelerinin azaltılması amaçlanmaktadır [15-20,34]. Kimyasal yöntemler, seyreltme (karışım), piroliz, transesterifikasyon ve mikroemülsiyon yöntemleri olmak üzere dörde ayrılmaktadır.

Seyreltme / Karışım Oluşturma

Karışım oluşturma bitkisel yağlara belli oranlarda dizel yakıtı katılarak yağın viskozitesi düşürülmektedir. Bitkisel yağlar benzer moleküler yapıya sahip olduklarından dolayı dizel yakıtı ile doğrudan karıştırılabilmektedir. Ancak bitkisel yağın yüksek karışım oranlarında ve düşük sıcaklıklarda karışımın kararlılığı bozulmaktadır. Bu durum motor için olumsuz sonuçlara neden olmaktadır [15-20,34].

Proliz

Proliz veya kraking işleminde kimyasal bağların daha küçük moleküller oluşturmak üzere oksijensiz ortamda bulunan bileşenin ısı veya katalizör yardımıyla başka bir bileşene dönüşümüdür. Bu yöntemle yağların yakıt özellikleri, dizel yakıtı özelliklerine yaklaşmasına rağmen, enerji tüketiminin yüksek olması en önemli olumsuzluğu olarak gösterilmektedir [15-20,34].

Transesterifikasyon

Alkoliz olarak da adlandırılan transesterifikasyon, kimyasal olarak serbest yağ asitlerini etkisiz hale getirerek trigliserit moleküllerini veya karmaşık bir yağ asidini gliserinden ayırma ve sonucunda bir alkol esteri oluşturma işlemidir. Bu yöntemde üretilen yakıt biyodizel olarak adlandırılmaktadır [15-20,34].

Transesterifikasyon yöntemiyle biyodizelin üretiminde ve bu yakıtın kullanımında çeşitli olumsuzluklar ortaya çıkmaktadır. Bunlar; biyodizelin üretim maliyetinin yüksek olması, üretimde açığa çıkan gliserini değerli bir ürün haline getirmek için ilave enerjinin harcanması, yakıtın 0 °C'nin altındaki düşük

sıcaklıklarda soğuk akış özelliklerinin olumsuzluk yaratması ve NO_x emisyonunun dizel yakıtına göre artış göstermesi şeklinde sıralanmaktadır [16,21,25,32-34].

Mikroemülsiyon

Mikroemülsiyon normalde karışmayan iki sıvının karışmasını sağlamak için ortak çözücü katkı maddesi olarak bütanol, oktanol ve hekzanol gibi çözücüler kullanılarak karışımların dizel motoru için gerekli viskozite değeri karşılanmaktadır. Ayrıca, bu çözücüler bitkisel yağlarla karıştırılarak dizel motorlarında kullanılacak biyoyakıtların çözünürlük oranları mikroemülsiyon yöntemi kullanılarak belirlenebilmektedir ve düşük sıcaklıklarda kararlı karışımlar elde edilebilmektedir [1,15-20,34,99].

Mikroemülsiyon oluşturma yöntemi ile hazırlanan yakıtların viskozitelerinde azalmalar ve püskürtme karakteristiklerin de iyileşmeler gibi olumlu sonuçlar elde edilmektedir. Ancak ısı değerleri, alkol içermeleri nedeni ile dizel yakıtına oranla daha düşüktür, bu durum güçte bir miktar düşmeye neden olmaktadır. Diğer taraftan, alkollerin gizli buharlaşma ısılarının yüksek olması yanma odasının bir miktar soğumasına bu da NO_x emisyonunun azalmasına neden olmaktadır. Bu yöntemle hazırlanan yakıtların özellikle dizel yakıtına alternatif olabilme niteliği gösterdiği değerlendirilmektedir [34,35,37,66,93].

3.2.1.6 Dizel Yakıtı Olarak Bitkisel Yağın Yanma Denklemi

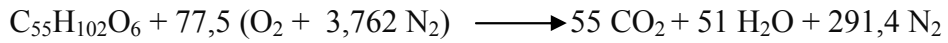
Kimyasal yapısında kütleli olarak yaklaşık %10-11 oksijen içeriği nedeniyle bitkisel yağların kimyasal formülleri dizel yakıtından farklılık göstermektedir. Bu farklılık nedeniyle bitkisel yağların teorik tam yanması için gerekli hava/yakıt oranı, hidrokarbon esaslı ve içeriğinde oksijen bulunmayan dizel yakıtından farklı olmaktadır.

Dizel yakıtı ve bitkisel yağın yanması sonucu elde edilen motor performans ve egzoz emisyon sonuçlarının daha verimli bir şekilde karşılaştırılabilmesi açısından çalışma kapsamında kullanılan pamuk yağının yanması için gerekli H/Y oranının hesaplanması gereklidir.

Pamuk Yağının Teorik Tam Yanma Denklemi

Literatürde yapılan çalışmalarda bitkisel yağların kimyasal yapılarındaki oksijen içeriğinin aynı olduğu ancak karbon ve hidrojen sayılarının farklılık gösterdiği anlaşılmaktadır ve buna göre pamuk yağının kimyasal formülü $C_{55}H_{102}O_6$ olarak verilmektedir [24].

Pamuk yağının teorik tam yanma denklemi ise;



şeklindedir.

Teorik tam yanma için kütleli olarak H/Y oranı;

$$\frac{H}{Y} = \left[\frac{(77,5 \times 32) + (291,4 \times 28)}{(55 \times 12) + (102) + (6 \times 16)} \right] = \frac{10639,2}{858} = \frac{12,4}{1} \text{ olarak hesaplanır. (3.1)}$$

Dizel yakıtının kütleli H/Y oranının yaklaşık olarak 14,9/1 olduğu düşünüldüğünde, aynı çalışma koşullarında ve yanma odasına hacimsel olarak püskürtülen yakıt miktarlarının aynı olması durumunda, açığa çıkacak enerji miktarı dizel yakıtı için daha fazla olacaktır. Bu nedenle motordan aynı efektif gücü alabilmek için kütleli olarak daha fazla pamuk yağının kullanılması gereklidir.

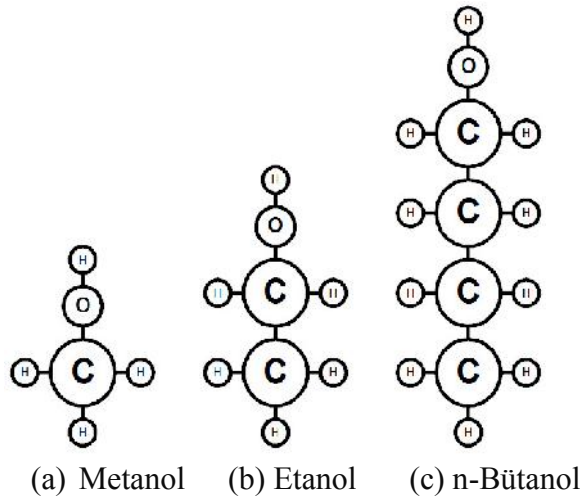
3.2.2 Alkoller

Hidrokarbon bileşiminde hidrojenlerden biri veya birkaçının yerine hidroksil (-OH) grubunun geçmesiyle oluşan bileşiklere alkol denir. Genel formül R-OH veya $C_nH_{2n+1}-OH$ şeklinde de ifade edilir. Bir bileşimin alkol olması için bir karbon atomuna yalnız bir -OH grubu bağlanmalıdır. Bütün alkoller yakıt olarak, kir ve lekelerin temizlenmesinde çözücü olarak, ilaçların ve çeşitli maddelerin yapımında başlangıç maddesi olarak kullanılmaktadır. Biyokütleden biyokimyasal yöntemler yoluyla elde edilen alkoller yenilebilir ve temiz yanma karakteristiklerinden dolayı fosil yakıtlara alternatif yakıt kaynağı olmaktadır [17].

3.2.2.1 Alkollerin Yapısı

Alkollerin fiziksel özellikleri C atomu sayısına bağlıdır. Alkollerin ilk üyeleri (karbon sayısı C_1 'den C_4 'e kadar) renksiz, akışkan ve su ile karışabilen sıvılardır. Kokuları hoş ve tatları acıdır. Orta üyeleri (C_5 'den C_{11} 'e kadar) sıvı yağ kıvamı gösterirler. Hoş olmayan bir kokuya sahiptirler. Yüksek üyeleri ise (C_{12} 'den itibaren) katı ve parafine benzerler. Koku ve tatları yoktur. Alkollerin kaynama noktaları her bir CH_2 grubunun çoğalması ile ortalama $18\text{ }^\circ\text{C}$ ile $20\text{ }^\circ\text{C}$ artar. Aynı sayıda C atomu içeren hidrokarbonlara kıyasla, alkollerin kaynama noktaları çok daha yüksektir. Bunun nedeni, molekülleri arasında hidrojen bağı içermeleridir [129].

Alkoller yanma ısını düşüren bir veya daha fazla oksijen atomu içeren oksijenli yakıtlardır [1]. İçten yanmalı motorlarda kullanılan alkollerin en başında etanol (C_2H_5OH) ve ona göre az kullanılan metanol (CH_3OH) gelmektedir. Etanol metanole göre daha yaygın kullanılan bir alkol çeşididir. Ancak son yıllarda alkollerin dizel motorlarında alternatif yakıt olarak kullanılması ile ilgili sınırlı sayıda yapılan çalışmalarda metanol ve etanole göre daha üstün yakıt özelliklerine sahip olan alkol çeşidi olarak n-bütanol (C_4H_9OH) ön plana çıkmaktadır [35,37,41]. Etanol ve n-bütanol biyokütleden fermantasyon yoluyla üretilebilirken, metanol kömür ve petrol türevli maddelerden üretilmektedir. Böylece etanol ve n-bütanol, metanole göre biyokütleden üretilebilen yenilenebilir bir alkol çeşididir [34-37]. Şekil 3.11'de metanol, etanol ve n-bütanolün molekül yapısı gösterilmektedir.



Şekil.3.11: (a) Metanol, (b) Etanol ve (c) n-Bütanol molekül yapısı

n-Bütanolün Üretimi

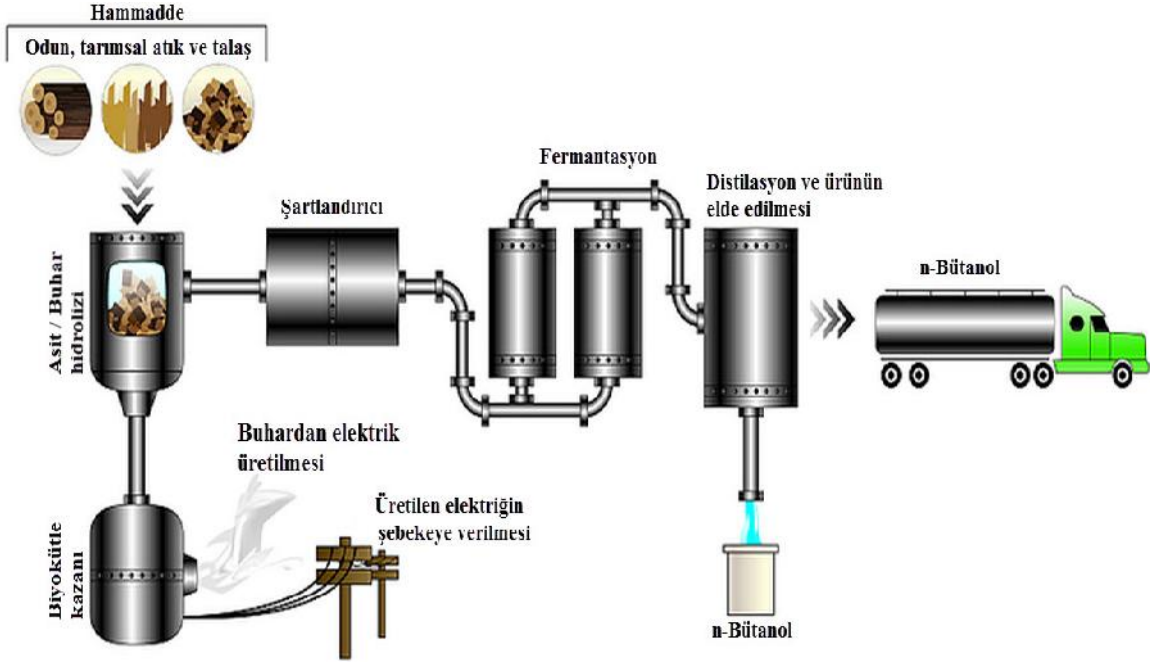
n-Bütanol biyokütleden üretildiğinde biyobütanol, petrolden üretildiğinde ise petrobütanol olarak adlandırılmaktadır ancak her ikisi de aynı kimyasal özelliklere sahiptir [37]. 20'nci yüzyılın başlarında endüstriyel olarak uygulanmaya başlanan aseton, bütanol, etanol (ABE) prosesi, 1950'li yıllarda petrokimyasal yolla daha ucuz bütanol üretiminin başlamasıyla kesintiye uğramıştır. Ancak günümüzdeki alternatif yakıt arayışları ile birlikte, ABE fermantasyonu ile üretilen bütanol yeniden ön plana çıkmıştır [42-47,130].

Bütanol biyokütlenin hidrolize edilerek glikoza dönüştürülmesi ve anaerobik ABE fermantasyonu ile üretilerek, 3-6-1 oranında yaklaşık olarak %55,7 ile %73,9 arasında bütanol elde edilmektedir. Bu yöntem clostridial sp. olarak adlandırılmaktadır. Clostridium, gram pozitif, çoğu hareketli, obligat anaerob, katalaz negatif, fermentatif, endospor üreten çubuk şeklindeki bakterilerdir. Bu bakteriler karbonhidratları parçalayarak, butirik asit, asetik asit, aseton, bütanol, izopropanol, etil alkol ve karbondioksit oluşturmaktadır [42-47].

Etanol üretiminde kullanılan şeker (şeker pancarı, şeker kamışı, melas), nişasta (patates, mısır, buğday), selülozik biyokütle (tarımsal atıklar) bütanol üretiminde de kullanılmaktadır [17]. Ayrıca, clostridium'ların en önemli avantajlarından biri, etanol üreticisi mikroorganizmaların kullanmadığı lignoselülozik (atık kâğıt) yenilenebilir tarımsal atıkların parçalanma ürünleri dâhil pek çok şekeri karbon kaynağı olarak kullanabilmeleri gösterilmektedir. Buna göre bütanol, su yosunu, sentetik gaz ve biyodizel üretiminden açığa çıkan gliserinden de üretilabilmektedir.

Özellikle yapılan son çalışmalarda biyodizel üretiminden açığa çıkan yaklaşık %10 atık gliserinin saflaştırılması yerine atık halinden bütanol üretim prosesinin geliştirilmesi biyoyakıt olarak biyodizel ve bütanol üretimini desteklemektedir. [37,47,78]. Bütanol üretiminde gıda amaçlı kullanılmayan hammaddelerin kullanılması üretim maliyetini azaltmaktadır. Etanol üretim prosesi fermantasyon ve distilasyon ünitelerinde çok az bir değişimle bütanol üretimine dönüştürülebilmektedir [37]. Gıda amaçlı kullanılmayan biyokütleden bütanol üretim prosesi Şekil 3.12'de gösterilmektedir.

Bütanol endüstride daha çok plastik, aside dayanıklı vernik ve çabuk kuruyan otomobil boyalarının üretiminde kullanılmaktadır. Bütanol ve izomerleri ayrıca boya inceltici ve çözücüsü, fren sıvıları, ilaç ve antibiyotik, hormon, vitamin gibi doğal maddelerin üretiminde ekstrakte edici olarak kullanılmaktadır. Bütanolün son yıllarda gündeme gelen yeni ve önemli bir uygulaması, içten yanmalı motorlarda doğrudan veya çeşitli oranlarda karıştırılarak yakıt olarak kullanılmasıdır.



Şekil 3.12: Biyokütleden bütanol üretim prosesi

Dünya genelinde en çok ABD ve Brezilya'da başta olmak üzere İngiltere, Çin, Rusya ve Güney Afrika'da da üretimi yapılmaktadır [131]. Biyoyakıt üretimindeki en büyük iki şirket olan BP ve DuPont 2006'da biyobütanol prosesi geliştirmek ve üretmek amacı ile ortaklık kurduklarını açıklamış ve İngiltere'de British Sugar'a ait bir etanol fabrikasını modifiye ederek yılda 30 bin ton bütanol üreteceklerini bildirmişlerdir. BP ve DuPont 2008 yılında yaptıkları çalışmaların sonuçlarında, bütanolün benzinle %10'un üzerinde karıştırılabileceğini ve bunun araçların performansını etkilemediğini ve ayrıca biyobütanol olarak bilinen bu yakıtın sürdürülebilir enerji probleminin çözümünde yeni nesil biyoyakıt olarak önemli bir rol oynayacağını vurgulamışlardır [42-47].

3.2.2.2 Alkollerin Dizel Motorlarda Kullanılması

Yenilenebilir sıvı yakıtların biyokütleden üretilmesi, oksijen içeriği sayesinde çevreye duyarlı olması ve ülkelerin petrole olan bağımlılığını azaltması gibi faydaları bu yakıtların üretimini ve kullanımını artırmaktadır. Organik molekül ailesinden olan alkoller yakıt olarak kullanılabilir [1]. Biyokütleden üretilen alkoller temiz yanma karakteristikleri nedeniyle içten yanmalı motorlar için büyük bir potansiyele sahip alternatif yakıtlardır. Genel olarak alkoller karbon sayısına bağlı olarak dizel yakıtına göre düşük setan sayısına, benzine göre yüksek oktan sayısına sahip bileşiklerdir. Yüksek oktan sayısı sayesinde benzinli motorlarda benzine alternatif olarak doğrudan veya karışım oluşturma şeklinde uzun yıllardan beri kullanılabilir [34,35,74].

Alkollerin dizel motorlarında kullanılması öncelikle kirletici emisyonlar ve fosil yakıt kullanımının azaltılması yönünden çok önemlidir. Ancak alkollerin dizel motorlarında alternatif yakıt olarak kullanılmasında düşük setan sayısı başta olmak üzere çeşitli yakıt özellikleri nedeniyle doğrudan kullanılması mümkün olamamaktadır. Bu nedenle yapılan çalışmalarda motorda modifikasyon yapmadan, alkollerin dizel yakıtı ile belirli oranlarda karışım oluşturularak kullanılabilmesi araştırılmaktadır.

Dizel motorlarında yenilenebilir kaynaklardan elde edilebilen alkolün kullanılması konusunda en çok etanol ön plana çıkmıştır [37]. Bunun nedeni olarak etanolün üretiminde kullanılan hammaddenin temininin kolaylığı (şeker pancarı, kamış, melas), entegre üretimin mümkün olması (şeker fabrikası) ve benzinli motorlarda kullanılabilmesi gösterilebilmektedir. Ancak yüksek karbon sayısına sahip alkol grubuna giren ve etanol ile aynı üretim sürecine sahip olabilen n-bütanolün dizel motorlarında kullanılması ile ilgili çalışmaların sayısında son yıllarda giderek artış kaydedilmektedir.

Dizel motorlarında kullanılacak biyoalkol çeşidinin belirlenmesinde en önemli etken alkolün dizel yakıtı içerisinde her oranda çözünmesi ve her türlü hava şartlarında karışımın kararlılığının sağlanabilmesidir [34-37]. Sıvıların çözünme yeteneği su ile karşılaştırılarak belirlenebilmektedir. Bu nedenle aynı karbon yapısına

sahip bazı alkollerin kaynama noktaları ve sudaki çözünürlükleri incelendiğinde, düşük molekül ağırlıklı alkoller su ile karışabildikleri halde, eşdeğer büyüklükteki alkil halojenürler suda çözünemedikleri görülmektedir.

Su molekülü polar yapıya sahip olduğundan dolayı alkollerin sudaki çözünürlükleri doğrudan su ve alkol molekülleri arasında hidrojen bağları oluşmasına bağlanmaktadır. Alkolün hidrokarbon kısmı hidrofobiktir, yani su moleküllerini itmektedir. Hidrokarbon kısmının uzunluğu arttıkça alkolün polar moleküler yapıdaki çözünürlüğü azalmaktadır. Buna göre, düşük karbonlu metanol ve etanol suyla yeteri kadar karışabildikleri halde n-bütanolün ancak 8,3 gramı 100 ml suda çözünebilmektedir. Buradan metanol ve etanolün polar moleküler yapıya, n-bütanolün ise semipolar (yarı polar, yarı apolar) yapıya sahip olduğu anlaşılmaktadır [35].

Polar moleküler yapıda olan etanol dizel yakıtı ile karıştırıldığında dizelin yapısındaki aromatik içerik ikili karışımı tam sağlayamamaktadır [132]. Bu nedenle etanolün dizel motorlarda apolar molekül yapısına sahip dizel yakıtı ile karışım oluşturma şeklinde kullanılmasında 10 °C'nin altındaki sıcaklıklarda faz ayrışması gerçekleşmektedir ve faz ayrışması motorda korozyondan kaynaklanan aşınmaya ve hassas yakıt pompasında yağlama problemine neden olmaktadır [76]. Ayrıca, bu ayrışma yakıt karışımının uzun depolanmasında yakıt kalitesini olumsuz etkilemektedir. Alkol molekülleri alkil ve hidroksil içermektedir, bu molekülde karbon sayısı ne kadar yüksek olursa dizel yakıtı ile de o kadar kolay karışabilmektedir [37,85]. Faz ayrışmasını engellemek ve homojen bir karışım oluşturarak karışımın kararlılığını sağlamak için hem etanol ile hem de dizel yakıtı ile çözünebilir ortak çözücü (co-solvent) kullanılması gerekmektedir [38-41]. Bu durum dizel motorlarda biyoyakıt olarak etanolün kullanımını sınırlandırmaktadır.

Bu nedenlerden dolayı etanolün dizel motorlarda gösterdiği olumsuz özellikleri giderebilecek, bu alkole göre daha avantajlı ve rakip olabilecek nitelikte olan biyoalkol çeşidi olarak n-bütanol gösterilmektedir [42-47]. Etanol ve n-bütanolün bazı önemli yakıt özellikleri Tablo 3.7'de gösterilmektedir [34,35,37].

Etanol ve n-bütanolün yakıt özellikleri incelendiğinde, yüksek karbon sayısı sayesinde n-bütanol etanole göre, yüksek setan sayısı, yüksek ısı değeri, yüksek

viskozite, yüksek alev hızı, düşük buharlaşma ısısı ve basıncı, düşük tutuşma sıcaklığı, çok düşük korozyon oluşturma riski, düşük polarite (semipolar) ve ayrıca ortak çözücü özelliği sayesinde apolar özellik gösteren dizel yakıtı ve bitkisel yağlarla çok iyi karışım oluşturma gibi üstünlükleri bulunmaktadır [35,48,49,81,89,91]. Bu noktada dizel yakıtı ile karışım oluşturmada alternatif yakıt olarak n-bütanol etanole göre tercih edilecek bir alkol çeşidi olmaktadır.

Tablo 3.7: Etanol ve n-bütanolün yakıt özellikleri

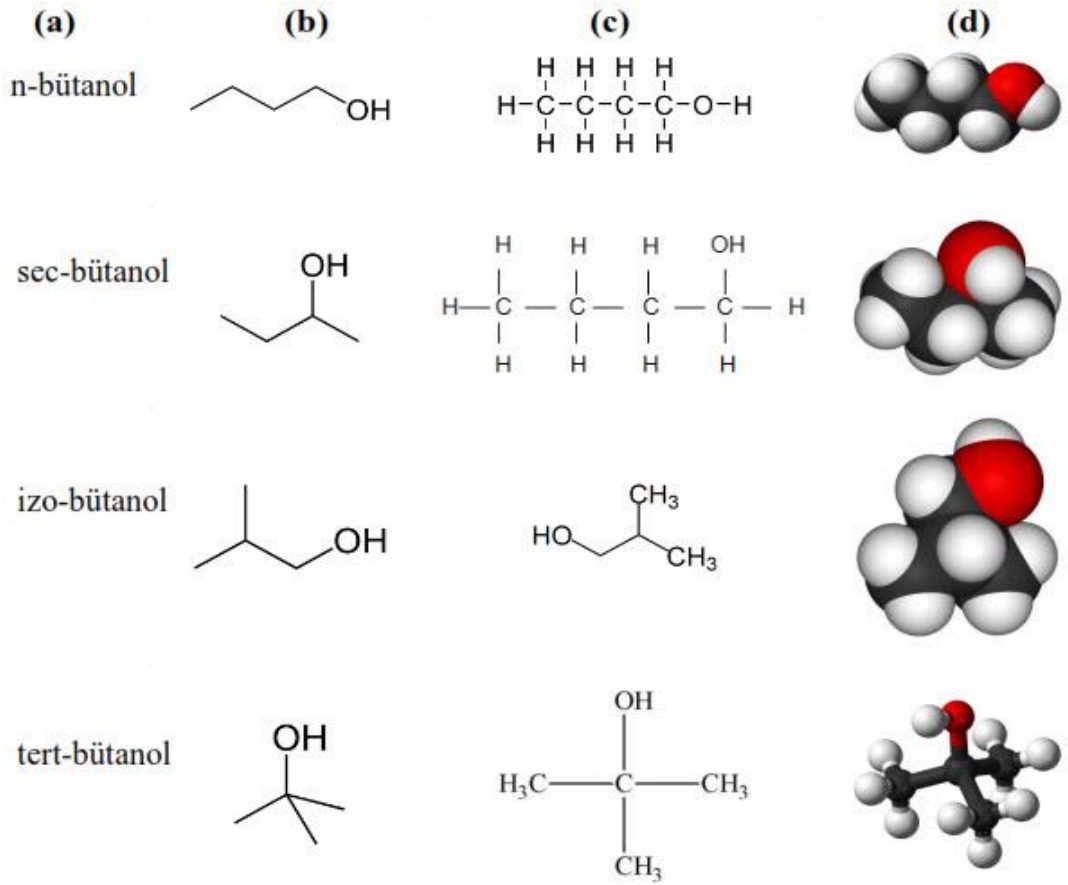
Özellik	Etanol	n-Bütanol
Molekül Ağırlığı (kg/kmol)	46,07	74,12
Yoğunluk (g/ml-20 °C)	0,789	0,810
Viskozite (mm ² /s - 40 °C)	1,08	2,23
Setan Sayısı	8	17
Alt ısıl değer (MJ/kg)	26,8	33,1
Bulk Modül (MPa)	1320	1500
Alev hızı (cm/s)	39	47,7
Donma noktası (°C)	-114,3	-89,5
Parlama noktası (°C)	8	35
Kendi kendine tutuşma sıcaklığı (°C)	434	385
Kaynama noktası (°C)	78,4	117,7
Buharlaşma ısısı (kJ/kg- 25 °C)	904	582
Buhar basıncı (kpa-38 °C)	13,8	2,27
Oksijen içeriği (%)	34,8	21,6

3.2.2.3 Dizel Yakıtı Olarak n-Bütanol

Sıvı biyoyakıtlardan olan bütanol biyokimyasal yöntemlerle üretilen ikincil biyoyakıtların ikinci nesil sıvı yakıtları olarak tanımlanmaktadır [17]. Amerikan çevre koruma örgütü (EPA) tarafından yapılan düzenlemede biyokütleden üretilen bütanolün motorda hiçbir modifikasyon yapmadan %11,5 oranında benzin ile karıştırılarak kullanılabilmesi belirtilmiştir [35]. Dizel motorlar için herhangi bir düzenleme olmamasına rağmen, yakıt özellikleri bakımından dizel yakıtı ile benzer olan ve dizel yakıtı ile her oranda karışım oluşturma yoluyla kullanılabilen n-bütanol yakın gelecekte dizel motorlar için önemli bir biyoyakıt kaynağı olacaktır [35,37].

Kapalı formülleri aynı açık formülleri farklı olan alkollere izomer alkoller denir. Alkoller karbon atomuna bağlanan hidroksil grubu ile tanımlanmaktadır. Bütanolün (C₄H₉OH) yapısında dört karbon bulunur ve karbon zinciri -OH grubunun bağlandığı yere göre düz veya dallanmış şeklindedir. Karbon zincirinin şekli ve -OH grubunun bağlandığı yer bütanolün dört adet izomerini oluşturmaktadır. Bu izomerlerin her biri farklı fiziksel özelliklere sahiptir.

En iyi bilinen düz zincir yapısına sahip olan ve -OH grubu karbon zincirinin en sonunda bulunan izomeri 1-bütanol veya n-bütanoldür. Bununla birlikte, düz zincir yapısında -OH grubu karbon zincirinin ortasında bulunan izomeri 2-bütanol veya sekonder bütanol, dallanmış zincir yapısında -OH grubu karbon zincirinin sonunda bulunan izomeri izo-bütanol ve dallanmış zincir yapısında -OH grubu karbon zincirinin ortasında bulunan izomeri tert-bütanol olarak adlandırılmaktadır. Şekil 3.13'te bütanol izomerleri ve molekül yapıları gösterilmektedir [37].



Şekil 3.13: Bütanol izomerleri ve molekül yapısı

(a) İzomer, (b) Zincir yapısı, (c) Kimyasal formülü, (d) Üç boyutlu yapısı

Bu izomerler arasında yakıt özellikleri bakımından dizel yakıtına yakın özellikler gösteren en ideal izomer olarak n-bütanol gösterilmektedir [35,37,49]. Ayrıca, bütanol izomerleri ile hava karışımlarının laminer yanma hızı ve alev kararlılığının incelendiği çalışmalarda adyabatik alev sıcaklığının bütanolün izomerlerinde aynı seviyede olduğu belirtilmiştir. Ancak moleküler yapının alev hızını etkilediği ve C-H bağlarının enerjisi ile -OH grubunun bağlandığı C atomu ve bağların zincir yapısının laminer yanma hızını etkilediği belirtilmiştir. Buna göre düz zincir yapısındaki C-H bağ enerjisi dallanmış zincir yapısına göre daha yüksektir. Moleküler yapı içindeki C-H bağ sayısı da düz zincir yapısına sahip n-bütanol izomerinde daha çok olduğundan bağ enerjisi de fazladır. Bağ enerjisi fazla olduğu için laminer yanma hızı da yüksektir [133-135]. Bu durum yanma performansı açısından n-bütanolün dizel motorlarda kullanılmasında olumlu etki göstermektedir [35,37].

Dizel yakıtı ile karışımlarında n-bütanol, herhangi bir faz ayrışması olmadan ve dizel yakıtı içerisinde katkı maddesine gerek duyulmaksızın çok iyi bir çözünme gerçekleştirmektedir [99]. Bu durum etanole göre n-bütanolün yakıt olarak depolanması ve kullanılması aşamaları dâhil karışımının soğuk hava şartlarında kararlı bir şekilde kalmasını sağlamaktadır ve çok önemli bir özelliktir. n-Bütanol düşük buhar basıncı ve yüksek parlama noktası ile yüksek sıcaklıklarda dizel motorlarda kullanımda etanole göre daha güvenlidir. Etanolün taşınması için özel araçların kullanılması gerekirken, bütanol mevcut petrol boru hattı sistemleriyle taşınabilmektedir [37].

Dizel yakıtı ile n-bütanol karışımlarının dizel motorlarında kullanılması ile ilgili yapılan sınırlı sayıdaki çalışmalarda n-bütanolün etanole göre yüksek setan sayısı ve ısıl değeri sayesinde motor performansı, yüksek viskozite ve düşük duharlaşma ısısı sayesinde de egzoz emisyonu açısından olumlu sonuçlar elde edilmiştir [76-87]. n-Bütanol ile biyodizel emisyon yönünden karşılaştırıldığında ise n-bütanolün daha fazla oksijen içerdiğinden dolayı duman emisyonu önemli derecede azaltmaktadır ve yüksek buharlaşma ısısının yol açtığı düşük yanma sıcaklığından dolayı da NO_x emisyonunu azalmaktadır [37].

Dizel yakıtı ile karışım oluşturma haricinde n-bütanol, etanol ile dizel yakıtı karışımlarında faz ayrışmasını engellemek için ortak çözücü özelliği sayesinde katkı

maddesi olarak kullanılabilir [58,74,75]. Ayrıca, biyodizel ile dizel yakıtı karışımlarının düşük sıcaklıklarda gösterdiği olumsuz soğuk akış özelliklerini iyileştirmek ve dizel yakıtının özelliklerine yakın hale getirmek için katkı maddesi olarak, biyodizel üretiminde etanol veya metanolün yerine ve bitkisel yağların viskozitelerini azaltmak için bitkisel yağ ile karışım oluşturmada da etkili bir şekilde kullanılabilir [38-41,94,95,99].

3.2.2.4 Dizel Yakıtı Olarak n-Bütanolün Yanma Denklemi

n-Bütanolün kimyasal formülü C_4H_9OH olarak verilmektedir [35,37]. n-Bütanol 47,7 cm/s'lik laminer yanma hızına sahiptir. Yanmaya başladığında başlangıç sıcaklığı ve silindir basıncı arttıkça yanma hızının da artış gerçekleşmektedir [133-135].

n-Bütanolün teorik tam yanma denklemi ise;



Buna göre teorik tam yanma için kütleli olarak H/Y oranı;

$$\frac{H}{Y} = \left[\frac{(6 \times 32) + (22,57 \times 28)}{(4 \times 12) + (10) + (16)} \right] = \frac{824,01}{74} = \frac{11,13}{1} \text{ olarak hesaplanır.} \quad (3.2)$$

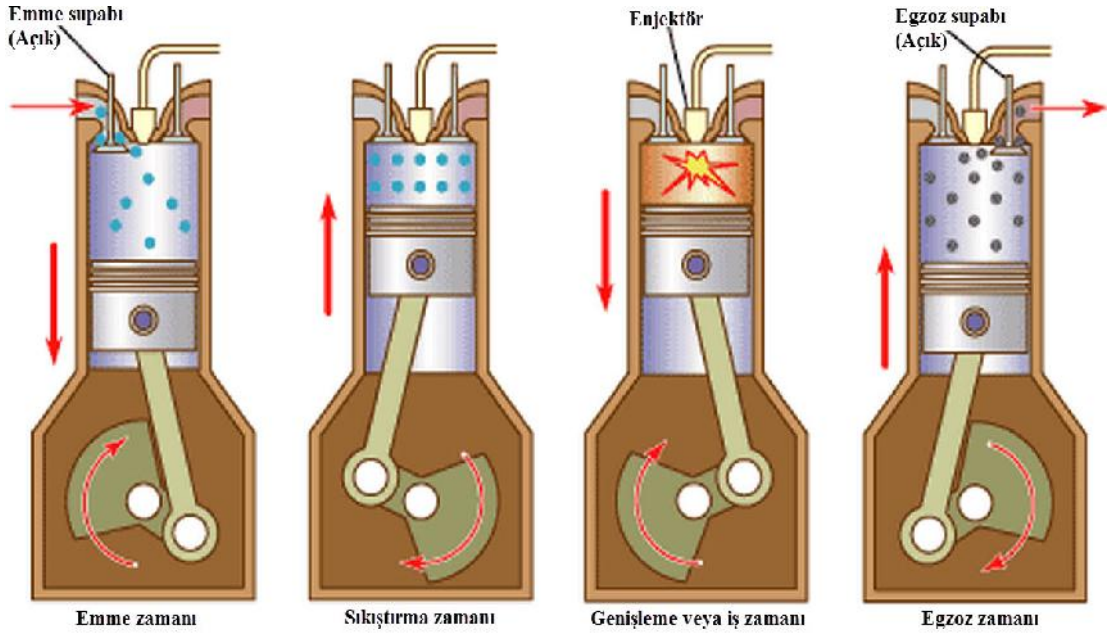
Dizel yakıtının kütleli H/Y oranının yaklaşık olarak 14,9/1 olduğu düşünüldüğünde, aynı çalışma koşullarında ve yanma odasına hacimsel olarak püskürtülen yakıt miktarlarının aynı olması durumunda, açığa çıkacak enerji miktarı dizel yakıtı için daha fazla olacaktır. Bu nedenle dizel yakıtı ile n-bütanol karışımlarında motordan aynı efektif gücü alabilmek için kütleli olarak daha fazla karışım yakıtının kullanılması gereklidir.

4. DİZEL MOTORLARDA YANMA

Yanma, oksijenin yakıtla birleşmesini etkileyen fiziksel, kimyasal ve termodinamik olayların toplamıdır. Bu birleşmede meydana gelen reaksiyonlar, oksitlenme reaksiyonlarıdır. İtten yanmalı motorlarda motor yakıtın yanmasıyla ısı enerjisini mekanik enerjiye dönüştürür [136].

4.1 Dizel Çevrimi

Dizel motorlarında, yalnızca hava, emme zamanı sırasında herhangi bir kısılmaya maruz bırakılmaksızın silindire tam olarak doldurulur. Silindire alınan bu hava yaklaşık 17:1 ile 22:1 oranında sıkıştırılarak basıncı ve sıcaklığı artırılır. Sıkıştırma zamanının sonuna doğru enjektörden silindir içerisine yüksek basınçta yakıt püskürtülerek, yakıtın hava ile karışması ve yanması sağlanır. Yanma sonucu açığa çıkan yanmış gazlar dışarı atılır. Dört zamanlı bir dizel motorunun çevrimi Şekil 4.1’de gösterilmektedir.

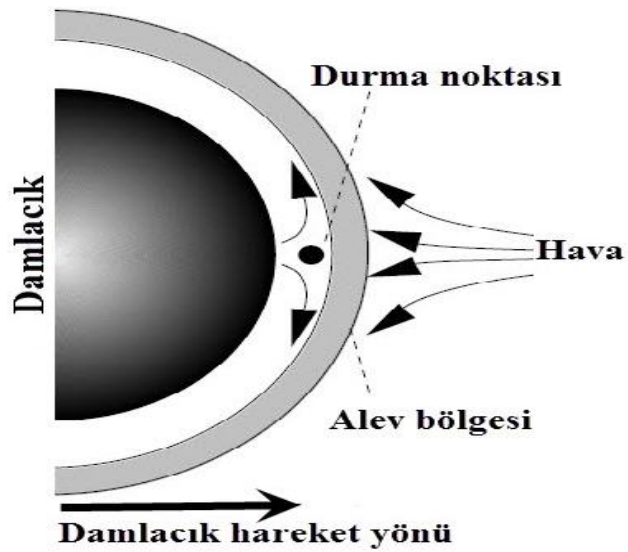


Şekil 4.1: Dört zamanlı bir dizel motorunun çevrimi

4.2 Dizel Motorlarda Yanma

Dizel motorlarda yanma sonu sıcaklığını mümkün olduğu kadar yüksek olması efektif verimi artırmaktadır. Bu artış motorda sıkıştırma oranını artırmakla sağlanmaktadır. Dizel motorlarında silindire sadece hava emilmekte ve en az, yakıtın kendi kendine tutuşma sıcaklığı elde edilinceye kadar sıkıştırılmaktadır. Kendi kendine tutuşmanın sağlanacağı sıcaklığa kadar sıkıştırılmış bulunan hava içerisine püskürtülen yakıt, dıştan bir ateşleme sistemine ihtiyaç göstermeden hemen tutuşur. Yakıtın silindire püskürtülmesi ile yanmanın başlaması arasındaki süre çok kısa olduğundan, yakıtın püskürtme zamanı dizel motorları için çok büyük bir önem taşımaktadır [109,138].

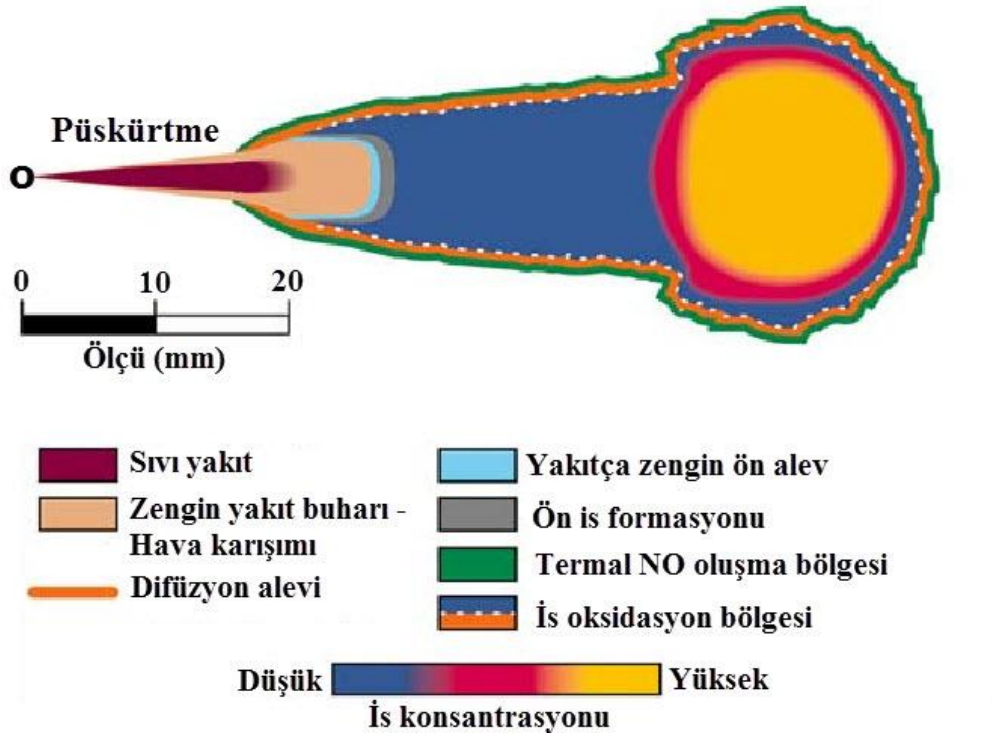
Yakıt, yüksek basınç altında, küçük deliklere sahip enjektörler ile silindire püskürtülür. Enjektörden püskürtülen yakıt, hava ile sürtünmesi sonucu parçalanır, yakıtta parçalanma oranı demet çevresinde sürtünmelerin fazlalığı nedeni ile daha fazla olur ve çevrede daha küçük taneli damlacıklar oluşur. Yüksek sıcaklık ve yoğunluktaki hava içerisine püskürtülen yakıt damlacıkları kısmen buharlaşır. Küçük taneli damlacıkların kütlelerine göre hava ile temas yüzeyleri daha fazla olduğundan ilk buharlaşan ve yanmaya hazır olan yakıt zerrelere demet çevresinde oluşur. Şekil 4.2'de yakıt damlacığının hava ile teması görülmektedir [141].



Şekil 4.2: Yakıt damlacığının hava ile teması

Damlacıkların hazırlanma zamanını tamamlayarak yanmaya başlaması, demet çevresinde birkaç noktada birden meydana gelebilir. İlk yanma başladıktan sonra mevcut yakıt demetinin içindeki süren püskürtme nedeni ile silindire giren yakıtın iyi bir şekilde yanması için dizel motorlarında değişik şekillerde hava hareketleri yaratılmaktadır [109,138,139]. Şekil 4.3'te DEC modeline göre püskürtme formasyonu görülmektedir [139,140,141].

Yakıt, bu fiziksel olaylarla birlikte tutuşmayı başlatacak bazı kimyasal reaksiyonlara da maruz kalır. Yanma işleminde yanmanın seyrine, yanma sonu basınç ve sıcaklıkların değerine doğrudan etki edecek bu reaksiyonlar tutuşma gecikmesi (TG), ani yanma, kontrollü yanma, art yanma olmak üzere dört safhada ele alınmaktadır. Dizel motorlarda yanma performansı için en önemli safha TG aşamasıdır [109,137,138].

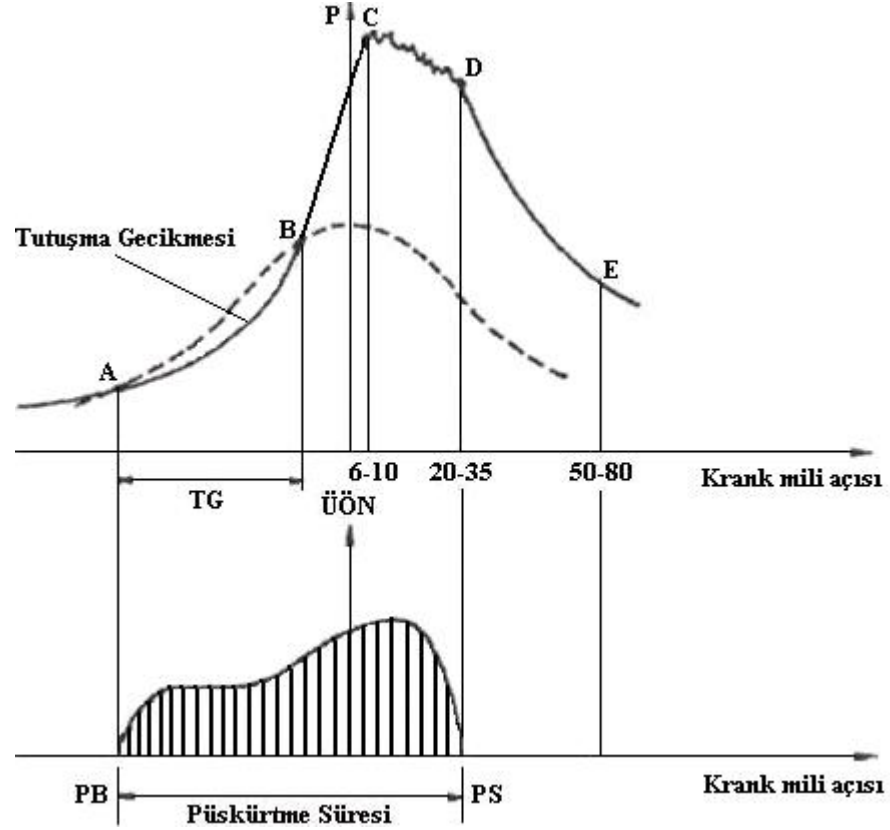


Şekil 4.3: DEC modeline göre püskürtme formasyonu

Tutuşma Gecikmesi

Tutuşma gecikmesi pratikte, püskürtmenin başlaması ile basınç yükselmesi olarak gözlenebilen, ilk ekzotermik reaksiyonun başladığı an arasındaki süre olarak tanımlanmaktadır. Bir diğer tanım ise yakıt enjeksiyonunun başlama zamanı ile yanmanın başladığı zaman A noktası ile B noktası arasındaki süredir [138]. Bu

zaman Şekil 4.4'te basınç ile krank mili açısı değişim diyagramından görülmektedir [109,142]. Basınç ile krank mili açısı diyagramında, sıkıştırma strokunun sonuna doğru basınç eğrisinin ani olarak yükseldiği B noktası, TG'nin sona erdiği ve yanmanın başladığı anı gösterir. TG süresince yakıtla havanın homojen bir karışım oluşturduğu kabul edilebilmektedir.



Şekil 4.4: Dizel motorlarında basınç-krank mili açısı değişim diyagramı

Yakıt zerreciklerinin buharlaşmasının belli bir süre aldığı kabul edilmektedir. Ancak zerrecikler etrafında, püskürtmenin hemen ardından bir buhar tabakası oluşmakta ve yanma bu buhar tabakasında başlamaktadır. Ondan sonraki buharlaşma ise tutuşma gecikmesini etkilememektedir. Dolayısıyla buharlaşma olayının tutuşma gecikmesine katkısı çok fazla olmamaktadır. Bununla birlikte tutuşma sonrası reaksiyon hızı, buharlaşma hızıyla doğru orantılıdır. Aynı zamanda buhar fazındaki yakıtın yanma hızı da buhar tabakasını çevreleyen havanın oksijen konsantrasyonu ile orantılıdır. Bu gözlemler dizel motorlarda yanmanın, buharlaşma tamamlanmadan başladığını göstermektedir.

Tutuşma gecikmesi süresi, yakıtın buharlaşması (fiziksel tutuşma gecikmesi) ve bunu takip eden tutuşma anına kadar olan ön reaksiyonların oluştuğu (kimyasal tutuşma gecikmesi) safhalardan ibarettir. Motorun çalışma koşullarını sabit tutup, sadece emilen hava içerisindeki oksijen konsantrasyonunu değiştirerek yapılan deneylerde fiziksel gecikme tek başına TG zamanını kontrol eden etken olarak görülmemektedir. Kimyasal gecikme de aynı oranda etki etmektedir [109,137,142].

Tutuşma gecikmesi süresi uzun ise yakıt ile havanın karışması için daha çok zamana ihtiyaç var demektir. Tutuşma gecikmesi süresince krank dönme açısına gecikme açısı denir. Bu açı krank açısız hızı ile tutuşma gecikmesi süresinin çarpımına eşittir. Yakıt pompası, krank miline bağlı olduğundan tutuşmadan önce püskürtülen yakıt miktarı gecikme açısı ile orantılıdır.

Dizel motorlarında Y/H oranı yanma olayının başlaması bakımından pek önemli değildir. Çünkü silindir içerisinde Y/H oranı sıfır ile sonsuz arasında değişen birçok nokta vardır. Yanma, tutuşma için en uygun orana sahip nokta veya noktalarda başlar. Püskürtme karakteristiği veya atomizasyon derecesi de Y/H oranındaki bu sonsuz değer değişimini etkilemez. Dolayısıyla bunların TG üzerinde önemli bir etkisi yoktur.

Tutuşma gecikmesini etkileyen en önemli faktörler yakıt kalitesi, basınç ve özellikle sıcaklıktır. Yüksek sıcaklık ve basınç TG süresini kısaltmaktadır. Yakıt jetinin silindir cidarlarına kadar ulaşması durumunda, eğer duvarlar çok sıcak ise TG süresi önemli derecede kısalmaktadır. TG süresince püskürtülen yakıt miktarının değişmesi ise tutuşma gecikmesi süresini etkilememektedir. Tutuşma gecikmesi safhasında temel olarak, reaksiyon hızları kısmen düşüktür ve reaksiyon ürünleri ara ürünlerdir, yakıt TG süresince silindir içerisine girer ve tutuşma başlayıncaya kadar birikir, fiziksel ve kimyasal olaylar sonucu oluşan pratik basınç ve sıcaklık değişimleri ihmal edilecek derecededir [109,142,143].

Ani (KontROLSÜZ) Yanma

Tutuşma gecikmesi süresi içinde silindire püskürtülen yakıt ısınır oksijenle karışır ve buharlaşır. İlk alev çekirdeği meydana geldiği anda, yakıtın hepsi birden yanmaya katılır ve hızlı bir yanma oluşur. Ani yanma safhası silindire püskürtülen yakıtın yanmaya başladığı ilk anda başlar. Bu yanma sonucu silindir içerisinde basıncın ani olarak artmasına neden olur. Yanma odasında meydana gelen bu fazla basınç karakteristik dizel motoru vuruntusuna sebep olur. Ani yanma safhası, silindir içerisine püskürtülen yakıtın tutuşmaya başladığı B noktasından maksimum basıncın elde edildiği C noktasına kadar geçen süreyi ifade etmektedir. Ani yanma safhasına, yakıtın atomizasyon derecesi, tutuşma gecikmesi süresi boyunca içeriye alınan yakıt miktarı, tutuşma gecikmesi süresince silindir içerisine alınan H/Y oranı ve silindir içerisindeki türbülans, silindir içerisine alınan yakıt miktarı etki etmektedir [89,137,138,141-143].

Kontrollü Yanma

Ani yanma safhasından sonra yanma odasında kalan yakıt, yakıt püskürtme işlemi devam ettikçe yanmaya devam eder. Yanmanın devam ettiği bu bölge hava tarafından etrafı sarılan yakıttan oluşmaktadır. Yakıt hava ile karıştığı sürece yanar. Ani yanma sonucunda meydana gelen hızlı yanma ile enjektörden püskürtülen yakıt kısa sürede yanabilir. Bunun için püskürtülen yakıt ayarlanarak basıncı kontrol edilir. İyi bir kontrollü yanma için püskürtme avansı ve türbülans iyi olmalıdır. Kontrollü yanma safhası maksimum basıncın elde edildiği C noktasından silindir içerisindeki dolgu miktarının büyük bir kısmının yandığı D noktasına kadar geçen süreyi kapsamaktadır.

Kontrollü yanma safhasının sonunda basıncı etkileyen faktörler, yakıtın silindir içerisine püskürtme hızına, motorun hızına motorun yanma odasının şekline, yakıtın silindir içerisine alındığında pistonun silindir içerisindeki konumuna göre değişim gösterir. Dizel motorda verimin yüksek olması için kontrollü yanma safhasının Ü.Ö.N'ye yakın bir yerlerde tamamlanması gerekmektedir [89,137,138,141-143].

Art Yanma

Kontrollü yanmanın ardından, egzoz supabının açıldığı ana kadar meydana gelen D ile E noktası arasında gerçekleşen reaksiyonlar art yanma olarak tanımlanmaktadır. Yanma işlemini tamamlamayan yakıtın, piston A.Ö.N'ye doğru hareket ederken egzoz supabının açılmasına kadar silindir içerisinde bulunduğu temiz hava ile meydana getirdiği yanmadır. Püskürtmenin sona ermesiyle silindir içerisinde kalan yakıt ve henüz yanmasını tamamlayamamış yanma ürünleri de türbülans ve oksijen miktarına bağlı olarak yanmaya devam etmektedir. Art yanma silindir içerisindeki hacim artışına bağlı olarak ani düşen basınç ve sıcaklık nedeniyle kısa sürmelidir [89,137,138,141-143].

4.3 Dizel Motorda Yanmayı Etkileyen Parametreler

Dizel motorlarda yanmayı belirleyen en önemli etkilere birisi tutuşma gecikmesidir. Tutuşma gecikmesi süresinin bağlı olduğu parametreler, yakıt spreyinin oluşumu ve giriş havasının durumu (basınç, sıcaklık ve hız) üzerinde etki gösteren fiziksel faktörlerdir. Bu nicelikler yakıt enjeksiyon sistemine, yanma odası dizaynına ve motor çalışma koşullarına bağlıdır. Yakıt sprey oluşumunu etkileyen enjeksiyon sistemi değişkenleri enjeksiyon zamanı, miktarı, hızı, oranı, damla boyutu ve sprey şekli ile tipidir. Uygun şarj koşulları ise yanma sistemine, yanma odası dizaynının detaylarına, giriş havasının sıcaklığı ve basıncına, sıkıştırma oranına, enjeksiyon zamanına, atık gaz durumuna, soğutma ve yağ sıcaklığına ve motor devrine bağlı olmaktadır. [109,138,141,142].

Enjeksiyon Zamanı

Enjeksiyon zamanının optimum değerinden büyük yada küçük oluşu, yanma olaylarını olumsuz etkilemekte ve motor performansını da kötüleştirir. Normal motor çalışma koşullarında (80 °C çalışma sıcaklığında ve düşük devirde) ve Ü.Ö.N'den yaklaşık 10°-15° önce yakıt enjeksiyonunda minimum tutuşma gecikmesi oluşur. Erken ya da geç enjeksiyon zamanlarında hava sıcaklığı ve basıncı Ü.Ö.N'ye çok yakın değiştiği için TG artar. Eğer enjeksiyon erken başlarsa başlangıçtaki hava sıcaklığı ve basıncı düşüktür, bu nedenle TG artacaktır. Eğer enjeksiyon geç başlarsa

(Ü.Ö.N'ye yakın) sıcaklık ve basınç ilk olarak yüksektir, fakat daha sonra gecikmenin devam etmesiyle azalır. Erken püskürtme, motor vuruntusu bakımından olumsuz olan uzun tutuşma gecikmesi süresine sebep olacağından, geç püskürtme ise yanma sonunu geciktirip fazla ısı kaybına neden olmaktadır. Bu nedenle tutuşma için en avantajlı durum, ikisi arasında gerçekleşmesidir [109,137,138].

Motor Hızı

Dizel motorlarında yüksek devirlerde TG açısı daha büyük olacağından gecikme süresince daha fazla yakıt püskürtülecek ve basınç yükselme hızı (dp/dt) değeri daha yüksek olacaktır. Düşük motor hızlarında TG süresince daha az yakıt birikeceğinden basınç yükselme hızı ve miktarı daha az olur. Yanma odasına giren havaya girdap hareketi oluşturmayan yanma odasına sahip dizel motorlarda, karışım hızı motor hızından oldukça bağımsızdır. Bu durumda karışımın ve yanmanın tamamlanması çok daha büyük krank açısı değerlerine karşılık geleceğinden yanma verimi düşer ve egzoz gazlarındaki is miktarı artar [109,138,142].

Yakıt/Hava Oranı

Dizel motorlarında Y/H oranı üzerinde, yanma yönünden bir sınırlama olmadığından dolayı, yanma odasına emilen hava ve püskürtülen yakıt miktarları üzerinden hesaplanan Y/H oranının basınç-krank açısı eğrisi üzerinde doğrudan bir etkisi yoktur. Çünkü silindir içerisinde sıfırdan sonsuza kadar değişen değerlerde Y/H oranları mevcuttur. Dolayısıyla önemli olan püskürtülen yakıt miktarı değil, yanma öncesi buharlaşan yakıt miktarıdır.

Y/H oranı azaldıkça yanma sonu ve silindir duvar sıcaklıkları azalacağından TG süresi artabilir. Y/H oranı üzerinde yanma yönünden bir sınırlama yoktur. Ancak düşük Y/H oranlarında istenilen püskürtme karakteristiğinin oluşturulabilmesi zordur. Bu ise yanma ile ilgili olmaktan daha çok mekanik bir problemdir. Dizel motorlarında Y/H oranına sınır koyan en önemli problem emisyonlardır. Her motor için emisyon açısından mutlaka pratik bir Y/H oranı sınırı vardır. Bu sınır aşılsa fazla yakıt ile havanın karışımı için yeterli zaman olmayacağından yakıtın büyük bir bölümü kısmen yanmış veya yanmamış olarak dışarı atılır. Bu durum, egzoz

gazlarında is emisyonunun artması ve silindir cidarlarında karbon birikimi gibi istenmeyen sonuçlara yol açar [109,137,138,142].

Sıkıştırma Oranı

Sıkıştırma oranının artması, sıkıştırma sonu basıncı ve sıcaklığını artırır. Ancak sıkıştırma sonu basıncı ve sıcaklığı belli bir sınırdan tutulmak zorundadır. Aksi takdirde motor parçalarının maruz kalacağı aşırı yüklenme ve zorlamalardan dolayı krank-biyel mekanizması zarar görmektedir. Sıkıştırma oranının TG üzerindeki etkisi net değildir. Sıkıştırma oranı arttıkça, artan basınç ve sıcaklıklar nedeni ile tutuşma gecikmesi süresi azalmaktadır. Fakat basınç artma hızı küçülür. Böylece motorun çalışması daha yumuşak olur. Sıkıştırma oranı tutuşma gecikmesini kontrol eder. Sıkıştırma oranı direkt püskürtmeli dizel motorlarında NO oluşumuna etkileyen önemli faktörlerden biridir [109,137,138,142].

Giriş Hava Sıcaklığı ve Basıncı

Dizel motorlarında emme zamanında silindir içerisine alınan havanın giriş basıncı arttıkça sıkıştırma sonu basıncı ve sıcaklığı artacağından tutuşma gecikmesi süresi kısalmıştır. Tutuşma gecikmesi süresinin kısılması yanmanın diğer safhalarını ve sonuçta yanma sonu basıncı ve sıcaklığını etkilemektedir. Dolgu havası giriş sıcaklığının artması tutuşma gecikmesi süresinin azalmasına neden olmaktadır. Çünkü emme zamanında silindir içerisine alınan daha yüksek sıcaklıklardaki havanın içerisine püskürtülen yakıt ile daha kolay ve kademeli buharlaşma sağlanmaktadır. Giriş hava sıcaklığı ve basıncı, gecikme periyodu boyunca şarj durumları üzerindeki kendi etkisi yoluyla TG'yi etkileyecektir.

Püskürtme anındaki basıncın gecikme üzerinde bir etkisi vardır, yüksek basınç gecikmeyi kısaltır, şarj sıcaklığı arttığında bu etki azalır. Çünkü gecikme periyodu boyunca hava sıcaklığı ve basıncı önemli değişkenlerdir. Püskürtme anındaki giren hava ve şarj havası durumu arasındaki ilişkinin etkisindeki diğer motor değişkenleri de gecikmeyi etkileyecektir. Böylece, sıkıştırma oranındaki artış tutuşma gecikmesini azaltacaktır ve büyük ölçüde püskürtme anındaki şarj havasının sıcaklığı ve basıncının değişimi yoluyla püskürtme zamanı gecikmeyi etkileyecektir. Giriş

basıncının artması TG ve dp/dt 'yi azaltır. Bu azalma temel olarak sıcaklık artışından kaynaklanmaktadır. Giriş basıncı arttıkça dolgu miktarı da artacağından, daha fazla yakıt püskürtülerek motor gücü de artırılabilir [109,137,138].

Soğutucu Akışkan ve Giriş Sıcaklıkları

Motor soğutma suyu ve giriş sıcaklıkları arttıkça TG ve dp/dt azalır. Bu, püskürtme sırasında silindir içerisinde daha yüksek bir sıcaklığın oluşmasındandır. Ancak içeriye emilen hava miktarı yani volumetrik verim azalacağından maksimum güç azalır ve is emisyonlarında artış meydana gelebilmektedir [109,138].

Yakıt Özelliği, Miktarı veya Yük

Dizel yakıtında en önemli özelliklerden bir tanesi setan sayısıdır. Yakıtın setan sayısı tutuşma gecikmesi süresini doğrudan etkileyen bir parametredir. Setan sayısı yüksek olan yakıtın, tutuşma gecikmesi süresi daha kısa olmaktadır. Ancak gereğinden yüksek setan sayısı çok kısa sürede tutuşma sağlayacağından ani yanma safhasındaki basınç artma oranını azaltır. Yakıtın çoğunluğu, kontrollü yanma safhasında yandığından silindir içerisinde oluşan maksimum basınç daha düşük olmaktadır. Ayrıca, karışımın sağlanabilmesi için daha az süre olması ve yakıtın yanma odası içerisinde iyi dağılamaması nedeniyle yanma hızı da azalmaktadır.

Yük arttığında, atık gaz sıcaklığı ve duvar sıcaklıkları artar. Bu durum yüksek şarj havası sıcaklığı ve basıncı ile sonuçlanır ve böylece TG kısalır. Bu artan sıcaklık için ayarlama yapıldığında, normal çalışma koşulları altında püskürtülen yakıt miktarının artırılmasının gecikme periyodu üzerinde önemli bir etkisinin bulunmadığı tespit edilmiştir. Motorun ilk çalışma koşulları altında, karışım içindeki daha büyük yakıt damlacıklarının sıcaklığa bağlı olarak buharlaşma ve ısınma süresinin artması nedeniyle TG süresi artar. İlk püskürtülen yakıt parçasının ilk olarak tutuştuğu göz önüne alındığında daha sonra püskürtülen yakıt TG'yi etkilemez.

Dizel motorlarından elde edilen güç yakıt miktarıyla ayarlanır. Maksimum güç elde edebilmek için tam gaz verilir. Ancak bu durumda iyi bir karışım teşkil etmek daha zordur ve egzoz emisyonları içindeki is miktarı artar veya silindir içerisinde

karbon birikintileri oluşur. Bundan dolayı Y/H oranına da bir üst sınır koyulması zorunlu hale gelir. Alt sınır ise, tutuşmanın başlayabileceği en düşük Y/H oranıdır. Sıcaklık ve basınç yüksek olduğundan çok az yakıt miktarı bile püskürtme sistemindeki mekanik problemlerin aşılması halinde yüksek bir termik verimle yanar. Sıcaklık ve basıncın yüksek olması ve yanmanın birden fazla noktada aynı anda başlaması nedeniyle, alev hızı problemi yoktur [109,138,142].

Girdap (Türbülans) Oranı

Silindir içerisindeki hava hareketi, yakıtın hava ile karışımına dolayısıyla yanma sürecine ve emisyonlara doğrudan etki etmektedir. Girdap oranındaki değişim yakıtın buharlaşması ve yakıt-hava karışım sürecini değiştirir. Aynı zamanda sıkıştırma esnasındaki silindir cidarlarındaki ısı transferini etkileyerek yakıtın püskürtülmesi anındaki şarj hava sıcaklığını değiştirir. Girdap oranı arttıkça tutuşma gecikmesi süresinde herhangi bir değişim olmadığı ancak, maksimum basıncın ve basınç artma oranının daha yüksek olduğu görülmüştür [109,137,138].

Silindir içerisine alınan dolgu hareketinin azaltılması püskürtülen yakıtın hava ile karışmasını azaltmaktadır. Yakıt hava karışımının kötüleşmesi, yanan karışım bölgesindeki yanmamış karışım miktarını arttırmaktadır. Bu durum NO_x emisyonunu azaltıcı etki göstermektedir.

Oksijen Konsantrasyonu

Yakıtın püskürtülmesi esnasındaki silindir içine alınan havasının oksijen konsantrasyonu tutuşma gecikmesini etkilemektedir. Oksijen konsantrasyonu azaldığında yakıt damlacıklarının buluşabileceği molekül sayısı da azalacağından tutuşma gecikmesi uzamaktadır [109,138].

4.4 Dizel Motorlardan Kaynaklanan Kirletici Emisyonlar

Hava kirliliği, havanın yapısının, doğal bileşiminde bulunan ana maddelerin değişmesi ya da yabancı maddelerin girmesi sonucu, insan sağlığı ve huzurunu etkileyecek, hayvan ve bitkilerin biyolojik yapılarına zarar verecek şekilde bozulması biçiminde tanımlanabilir. Motorlu taşıtların hava kirliliğinde önemli bir payı bulunmaktadır. İçten yanmalı motorlarda yakıt hava karışımlarının yanması sonucu açığa çıkan ve atmosfere salınan zararlı gazlar kirletici emisyonları oluşturmaktadır. Taşıt kaynaklı emisyonlar taşıtların, yanma teknolojilerine, emisyon katalizörlerine, yakıt türü ve miktarına, yaşına ve kullanım koşullarına bağlı olarak değişmektedir.

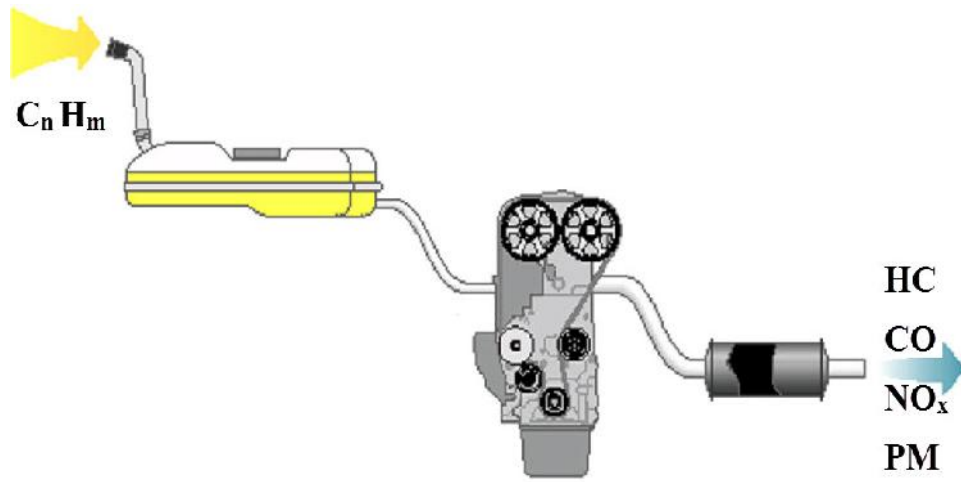
Motorlu taşıtların büyük bir çoğunluğunu ise yüksek verimlilik, düşük yakıt tüketimi, yüksek dayanıklılık ve geniş çalışma koşulları altında güç üretme yeteneği gibi avantajlara sahip olan dizel motorları oluşturmaktadır. Karayolu yük trafiği sürekli artmakta ve bu artış diğer taşıma araçlarının oranlarını düşürmektedir. Ancak dizel motorları taşımacılık, tarım ve denizcilik sektörlerinde geniş bir uygulama alanına sahiptir. Dizel motor teknolojisinde, motor performansı, enjeksiyon sistemi ve daha düşük yakıt tüketimi yönünde meydana gelen gelişmeler neticesinde dizel motorlu taşıtlar daha çok tercih edilmektedir. 2004-2011 yılları arasında yakıt türüne göre Türkiye'deki motorlu kara taşıtı sayısı Tablo 4.1'de görülmektedir [11].

Tablo 4.1: Yakıt türüne göre Türkiye'deki motorlu kara taşıtı sayısı

Yıl	Benzin	Dizel	LPG	Bilinmiyor	Genel Toplam
2004	5.569.192	3.346.355	819.007	501.803	10.236.357
2005	5.606.321	3.836.399	1.298.830	404.276	11.145.826
2006	5.935.725	4.372.042	1.569.951	349.675	12.227.393
2007	5.980.516	4.850.837	1.880.023	311.569	13.022.945
2008	5.952.746	5.323.478	2.276.283	212.888	13.765.395
2009	5.887.559	5.654.350	2.592.695	182.096	14.316.700
2010	5.762.156	6.195.898	2.973.832	163.717	15.095.603
2011	5.709.606	6.899.420	3.335.566	144.936	16.089.528

Motorlu taşıtlar çevreyi, egzoz emisyonu, yakıt-yağ buharı, kurşun bileşikleri, asbest ve lastik tozları, aşınma, paslanma ve korozyon sonucu oluşan gaz, sıvı ve katı atıklarla kirletmektedir. Bu kirleticilerin en etkin zararlı ve yoğun olanları egzoz gazından kaynaklanan kirleticilerdir.

Dizel motorlarının motorlu taşıtlar arasındaki yüzdesinin artmasıyla, dizel motorlardan kaynaklanan egzoz emisyonlarında da önemli derecede artış meydana gelmektedir. Dizel motorlarında yanma başlamadan önce silindir içerisine yakıt püskürtülmesi nedeni ile yakıtın dağılımı homojen olmamaktadır. Homojen olmayan dağılım nedeni ile silindir içerisinde de basınç ve sıcaklık dalgalanmaları ve farklı karışım bölgeleri meydana gelmektedir ve yanma düzgün olarak gerçekleşmemektedir. Yanmanın kötüleşmesi kirletici emisyonların oluşmasına neden olmaktadır. Dizel motorlardan kaynaklanan başlıca kirletici emisyonlar, NO_x , CO, HC, ve PM emisyonlarıdır [144,145]. Dizel motorunda yakıtın yanması sonucu oluşan ana kirleticiler Şekil 4.5'te görülmektedir.



Şekil 4.5: Dizel motorunda yakıtın yanması sonucu oluşan ana kirleticiler

Bu emisyonların miktarı ve değişimi, motorun tasarım özelliklerine ve işletme koşullarına bağlı olarak değişmektedir. Bununla birlikte artan sayıdaki dizel motorlu taşıtların egzoz emisyonları iklim değişimi, küresel ısınma ve insan sağlığını tehdit etme gibi olumsuzluklara yol açmaktadır. Kirletici emisyonların kontrol edilme gerekliliği nedeniyle üretilecek motorlu taşıtların egzoz emisyonlarının azaltılması büyük önem taşımaktadır. Bu nedenle Avrupa Birliği ülkeleri bu emisyonları kademeli olarak ve belirli bir takvim içerisinde azaltmak için emisyon standartları

belirlemiştir. Euro normu olarak adlandırılan standartlardan ağır ticari dizel motorları için oluşturulan standart Tablo 4.2’de gösterilmektedir [146].

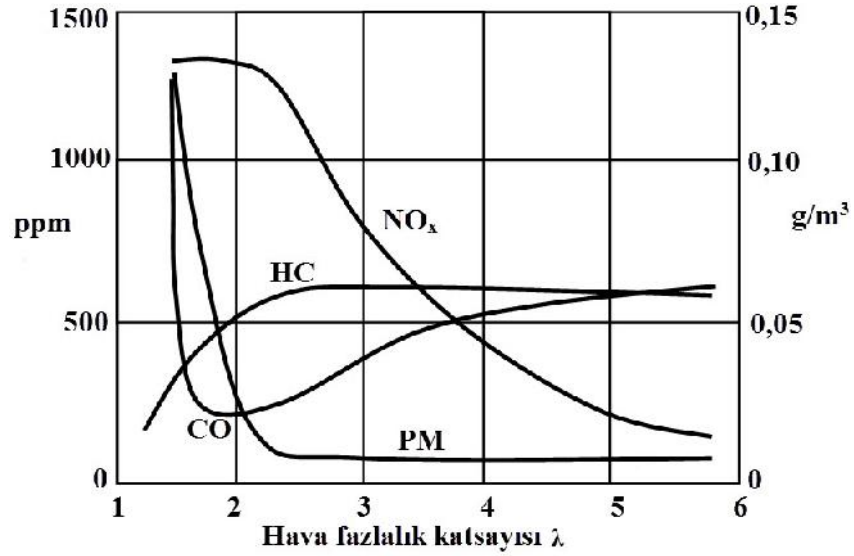
Tablo 4.2: Ağır ticari dizel motorları için AB emisyon standartları (g/kWh)

Standart	Tarih	Test Metodu	NO _x	CO	HC	PM	İs (m ⁻¹)	
Euro-1	1992, < 85 kW	ECE R-49	8,0	4,5	1,1	0,612	--	
	1992, > 85 kW		8,0	4,5	1,1	0,36	--	
Euro-2	1996		7,0	4,0	1,1	0,25	--	
	1998		7,0	4,0	1,1	0,15	--	
Euro-3	1999		ESC & ELR	2,0	1,5	0,25	0,02	0,15
	2000			5,0	2,1	0,66	0,10	0,8
Euro-4	2005	3,5		1,5	0,46	0,02	0,5	
Euro-5	2008	2,0		1,5	0,46	0,02	0,5	
Euro-6	2014	0,4		1,5	0,13	0,01	--	

Euro normlarını uygulayan ülkeler kirletici emisyonların bu değerlerini sağlayan motorlara sahip araçlara trafikte sürüş izni vermektedir. Özellikle euro-6 normuna sahip araçlarda bir önceki norma göre NO_x emisyonunda %80, HC emisyonunda %72 ve PM emisyonunda ise %50 azalma öngörülmektedir. Bu noktada kirletici emisyonların azaltılmasında biyoyakıt kullanımı önemli bir etken olmaktadır.

Dizel motorun gücü artırılmak istendiğinde silindir içerisine alınan havanın üzerine püskürtülen yakıtın miktarı artırılır. Daha fazla yakıt ile yanma sonu basıncı ve sıcaklığı artırılarak piston üzerine etki ettirilen indike güç artırılır [137,142]. Buna göre, dizel motorlarda yanma sonucu oluşan emisyonları etkileyen en önemli parametrelerden birisi hava fazlalık katsayısı (HFK)’dır. HFK, yanmaya katılan hava miktarının, teorik tam yanma için gereken hava miktarına oranıdır. Direkt

püskürtmeli bir dizel motorunda emisyon konsantrasyonları Şekil 4.6'da görülmektedir [145].



Şekil 4.6: Direkt püskürtmeli bir dizel motorunda emisyon konsantrasyonları

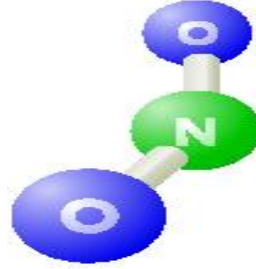
Dizel motorda verimli bir yanma için yanma odası içerisinde yeterli havanın, yeterli sürenin ve yeterli sıcaklığın olması gerekmektedir. Kirletici bileşenlerin oluşumu yanma olayına bağlıdır. Dizel motorları, genellikle fakir karışım oranlarında çalışmakta ve H/Y oranı yük durumuna göre değişmektedir.

Yanmaya katılan hava miktarı teorik olana eşitse HFK 1'e eşit, küçük ise HFK 1'den küçük (zengin karışım), büyük ise HFK 1'den büyük (fakir karışım) olacaktır. Dizel motorlar için ise HFK 1,2 ile 4,7 arasındadır [109,138]. HFK değişimine göre eksik yanma ürünü olan emisyonlar belirli konsantrasyonlarda olmaktadır. Dizel motorlardan kaynaklanan başlıca kirletici emisyonlar, NO_x, CO, HC, ve PM emisyonlarıdır [144,145].

4.4.1 NO_x Emisyonu

Dizel yakıtının yanması esnasında NO_x meydana gelir ve dizel motorlar için kontrol edilmesi gereken en önemli kirletici bileşendir. NO_x'in genel olarak, azot oksit (NO) ve azot dioksit (NO₂) olmak üzere en genel iki bileşeni vardır. NO_x, topraktaki ozon seviyesine katkıda bulunan ana bileşendir. Azot oksitler kandaki hemoglobinleri tutmakta ve oksijen taşınımını engellemektedir. Akciğerlerdeki

nemle reaksiyona girerek nitrik asit oluşumuna ve solunum yolu hastalıklarına neden olmaktadır. Ayrıca, kimyasal sis oluşumuna ve bunun etkisiyle bitki örtüsü için zararlı olan asit yağmurlarına neden olmaktadır. Şekil 4.7’de NO₂ molekülü görülmektedir.



Şekil 4.7: NO₂ molekülü

Azot oksit oluşumuna etki eden en önemli iki faktör sıcaklık ve oksijen konsantrasyonudur. Yanma odasındaki sıcaklık 1600 °C’nin üzerine çıktığında havanın içindeki azot molekülleri oksijenle birleşerek NO_x emisyonunu oluşturmaktadır. NO_x oluşumu genel olarak, ısıl NO_x, yakıt NO_x ve hızlı NO_x olmak üzere üç metotla tanımlanmaktadır [109,138,141]. Bir yakıttan oluşan bütün NO_x emisyonlarına, bu üç metodun her biri katkıda bulunur. Dizel yakıtların oluşturduğu NO_x emisyonlarının ana sebebi ısıl NO_x oluşumudur. NO_x genellikle aşağıdaki reaksiyonla oluşur.

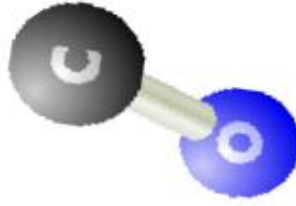


Ayrıca, yakıt ve hızlı NO_x oluşumu da egzoz gazı içerisindeki NO_x konsantrasyonunun artmasına katkı sağlar, fakat ısıl NO_x oluşumu yanında ihmal edilebilecek seviyededir. Isıl NO_x, yanma odasındaki yüksek sıcaklık ile havadaki oksijenin azot ile birleşmesi durumunda oluşmaktadır. Hidrokarbon parçacıklarının yanma odasında HCN gibi azot bileşiklerini oluşturmak için azotla reaksiyona girmesi sonucunda hızlı NO_x oluşmaktadır. Yakıt NO_x’i, yanma prosesi esnasında fazla oksijenle yakıt içindeki azot kimyasal bağının birleşmesiyle meydana gelmektedir. Bu çeşit NO_x oluşumu sadece yakıtların içerdiği azot kimyasal bağları ile ilgili bir problemdir [109,138,141].

HFK'nin 1'e yakın olduğu karışımlarda NO_x emisyonu en yüksek değerde iken karışımın zenginleşmesi veya fakirleşmesiyle egzoz gazları içerisindeki NO_x konsantrasyonu azalmaktadır. HFK'nin 1'den küçük olduğu durumlarda oksijen azlığından, HFK'nin 1'den büyük olduğu durumlarda ise adyabatik alev sıcaklıklarının düşmesi ve yanma sonu sıcaklığının düşmesinden NO_x konsantrasyonu azalmaktadır [147].

4.4.2 CO Emisyonu

Kokusuz renksiz ve patlayıcı olan CO çok zehirli bir emisyondur. Bu gazın kandaki oksijeni taşıma görevine sahip olan hemoglobine bağlanma yeteneği oksijene oranla yaklaşık 200 kere daha fazladır. Bu nedenle CO ortamında bulunan bir kişinin solunum yoluyla aldığı CO, kandaki normal hemoglobini bozar, vücut hücrelerinin oksijen alma olanağını engelleyerek zehirlenmeye ve boğulmaya neden olur [147]. Şekil 4.8'de CO molekülü görülmektedir.



Şekil 4.8: CO molekülü

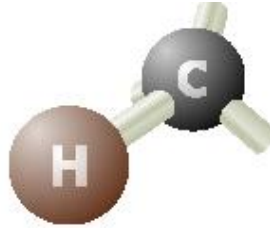
Yanma ürünleri arasında CO emisyonunun bulunmasının başlıca nedeni yanma odasındaki oksijen konsantrasyonunun yetersiz olmasıdır. CO oluşumunda en etkili parametre hava fazlalık katsayısıdır.

HFK 1'den küçük (zengin karışım) yani yanma odasında teorik tam yanma için gerekli hava miktarından daha az hava varsa, yakıtın kimyasal yapısında bulunan C atomları yeterince oksijenle temas geçerek yanma reaksiyonuna giremeyeceği için egzoz gazı içerisindeki CO konsantrasyonu artar. Silindir içerisine alınan havanın her bölgesi homojen bir yapı oluşturmadığı için bölgesel oksijen yetersizliği nedeniyle de, CO emisyonlarında artış meydana gelebilir.

4.4.3 HC Emisyonu

Taşıtlarda yakıt deposu ve karbüratörlerden buharlaşma yoluyla veya içten yanmalı motorlardan egzoz gazları ile birlikte atmosfere atılan yanmamış veya kısmi yanmış hidrokarbonlar genellikle kötü kokulu ve tahriş edici maddelerdir. Bu tür hidrokarbonlar arasında parafinler ve olefinlerin solunum yollarındaki mukozayı tahriş edici ve bayıltıcı etkileri de bulunmaktadır.

Aromatların ise kanser yapıcı özellikleri vardır. Hidrokarbonların kısmi oksidasyonu sonucu oluşan aldehitler ise keskin kokuları nedeniyle göz ve burun için rahatsız edici etkiye sahiptir. Gaz halindeki hidrokarbonlar güneş ışığı altında azot oksitlerle birleşerek “fotokimyasal sis-smog” olarak adlandırılan bir sis tabakası oluştururlar. Bu tabaka gözlerin yanmasına, solunum sisteminin etkilenmesine neden olurken, aynı zamanda bitki örtüsü için de zararlı olmaktadır [147]. Şekil 4.9’da HC molekülü görülmektedir.



Şekil 4.9: HC molekülü

Egzoz gazları içerisindeki HC bulunması yakıtın tam olarak yakılamadığını gösterir. HFK'nin 1'den küçük veya büyük olması HC emisyonu üzerinde artırıcı etki gösterebilir. Yanma odasındaki yakıt moleküllerinin yeterli oksijen bulamaması veya soğuk bölgelerdeki alev sıcaklığının düşmesi nedeniyle oksidasyon reaksiyonlarının yavaşlaması ve yanmanın tamamlanamaması, egzoz gazları içerisindeki HC emisyon konsantrasyonunu artırmaktadır.

4.4.4 İis Emisyonu

Silindir içinde sıvı halde bulunan yakıt damlacıklarının içindeki H₂ molekülleri, hızlı bir Şekilde reaksiyona girmekte (oksijenle birleŐmekte) ve geriye kalan C atomları yeterli oksijen bulamadığından yanamayarak is partikülleri halinde egzozdan atılmaktadır. Hidrojenleri ayrılan karbonca zengin büyük moleküller birleŐmekte (polimerizasyon) ve iri molekül gruplarının bir araya toplanması (aglomerizasyon) ile is zerrecikleri oluşmaktadır. Şekil 4.10'da PM molekülü görülmektedir.



Şekil 4.10: PM molekülü

İis partikülleri, yanma odası içerisindeki kanserojen ve tahriş edici etkisi olan yakıt ve yağ moleküllerini de hapsederek insan sağlığını doğrudan tehdit eden bir hale dnŐrlenir. İis oluşum miktarını etkileyen parametreler, yakıt tipi, enjeksiyon zamanı, enjeksiyon tipi, enjeksiyon hızı, yakıt püskürtme memesi Şekli, art püskürtme, taşıt yükü, Y/H oranı, emme havası sıcaklığı, soğutucu akıŐkana ısı kaybı, turboşarj, EGR oranı olarak sıralanmaktadır [147].

5. MATERYAL VE YÖNTEM

Tez çalışmasında, euro dizel yakıtı, n-bütanol ve nötr pamuk yağı üçlü karışımlarının farklı sıcaklıklardaki kararlı faz konsantrasyonları belirlenmiş ve düşük sıcaklıkta faz ayrışması gerçekleşmemesi için en düşük sıcaklıkta kararlı faz sergileyen karışımlar arasından dizel motor performansı ve emisyon değerleri bakımından optimum karışım oranının belirlenmesi araştırılmıştır. Üçlü karışımların faz kararlılıklarının belirlenmesi ile ilgili çalışmalar Balıkesir Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Kimya Bölümü fizikokimya laboratuvarında, karışımların motor performansı ve egzoz emisyonlarının tespiti ile ilgili tüm deneysel çalışmalar Balıkesir 6'ncı Ana Bakım Merkezi Komutanlığında bulunan motor test düzeneğinde gerçekleştirilmiştir.

5.1 Materyal

5.1.1 Üçlü Karışım Bileşenleri

Tez çalışması kapsamında, üçlü karışımın birinci bileşeni olarak euro dizel yakıtı, ikinci bileşeni olarak yenilenebilir kaynaklardan üretebilen, yakıt özellikleri bakımından etanol ve metanol gibi alkollere göre dizel yakıtına daha yakın yakıt özelliği sergileyen n-bütanol ve üçüncü bileşeni olarakta ülkemizde bol miktarda üretilebilen, doğrudan gıda amaçlı değerlendirilemeyen nötr pamuk yağı kullanılmıştır. Euro dizel yakıtı Petrol Ofisi firmasından, %99 saflıktaki n-bütanol Tekkim firmasından, nötr pamuk yağı ise Kula Yağ Fabrikası aracılığıyla temin edilmiştir. Üçlü karışım bileşenleri Şekil 5.1'de görülmektedir.



Şekil 5.1: Üçlü karışım bileşenleri

5.1.2 Piknometre

Üçlü karışım bileşenlerin yoğunluklarının ölçülmesinde boot tipi piknometre kullanılmıştır. ASTM D941, D1217 ve DIN 51 757 standartlarına uygun olarak piknometre yardımıyla sıvıların yoğunlukları ölçülebilmektedir. Piknometreler küçük, hafif ve genelde camdan yapılmış kaplardır. Şekil 5.2’de boot tipi piknometre görülmektedir.



Şekil 5.2: Boot tipi piknometre

5.1.3 Yağ Analiz (GC) Cihazı

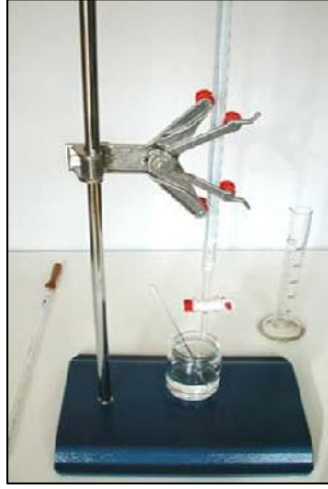
Nötr pamuk yağının, yağ asit kompozisyonlarının ölçümünde Agilent Technologies 6850 Network GC System marka test cihazı kullanılmıştır. Test cihazında taşıyıcı gaz olarak helyum ve 50-150 °C çalışma aralığında, 60 m uzunluğunda, 0,25 mm çapında ve 0,2 µm film kalınlığında HP-88 marka kolon bulunmaktadır. Şekil 5.3’te GC cihazı ve kolonu görülmektedir.



Şekil 5.3: GC cihazı ve kolonu

5.1.4 Titrasyon Düzenegi

Farklı sıcaklıklarda üç bileşenin birbirleri ile olan çözünürlük konsantrasyonlarının belirlemede titrasyon düzenegi kullanılmıştır. Titrasyon işlemi, belli hacimde derişimi bilinen bir bileşeni, derişimi bilinmeyen çözeltiliye ilave ederek yapılan işlemdir. Titrasyon işleminde büret, erlen, pipet ve hassas terazi kullanılmıştır. Bürete standart yani derişimi bilinen çözeltili (karışım) konur ve bu çözeltiliye titrant denir. Şekil 5.4'te titrasyon düzenegi görölmektedir.



Şekil 5.4: Titrasyon düzenegi

5.1.5 Soğutma Banyosu Cihazı

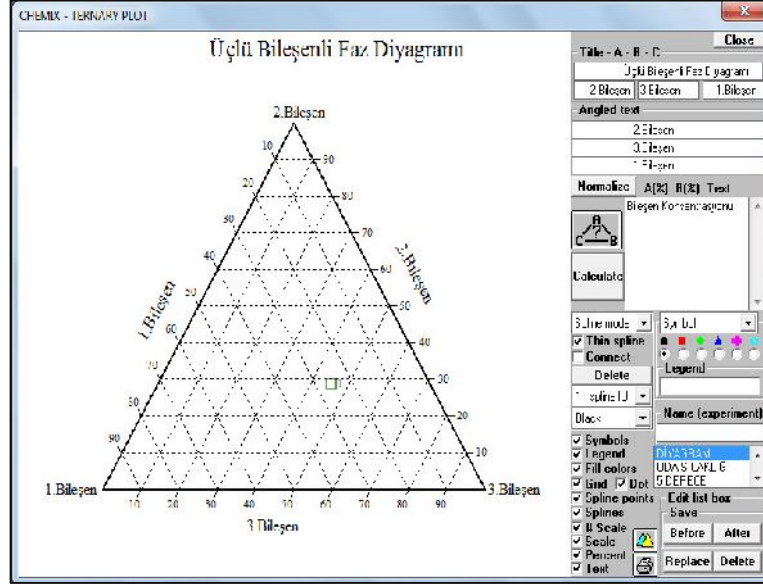
Titrasyon işleminde kullanılan bileşenlerin 0 °C, -5 °C ve -10 °C sıcaklığa soğutulmasında PolyScience 801 Heating Circulator marka soğutma banyosu cihazı kullanılmıştır. Şekil 5.5'te soğutma banyosu cihazı görölmektedir.



Şekil 5.5: Soğutma banyosu cihazı

5.1.6 Üç Bileşenli Faz Diyagramı için Çizim Programı

Beş farklı sıcaklıkta yapılan titrasyon işlemi sonuçlarından elde edilen konsantrasyonlar ile üç bileşenli faz diyagramının çizilmesinde CHEMIX School 3-50 (evaluation copy) programının “Ternary Plot” kısmı kullanılmıştır. Şekil 5.6’da üç bileşenli faz diyagramı çizim programı görülmektedir.



Şekil 5.6: Üç bileşenli faz diyagramı çizim programı

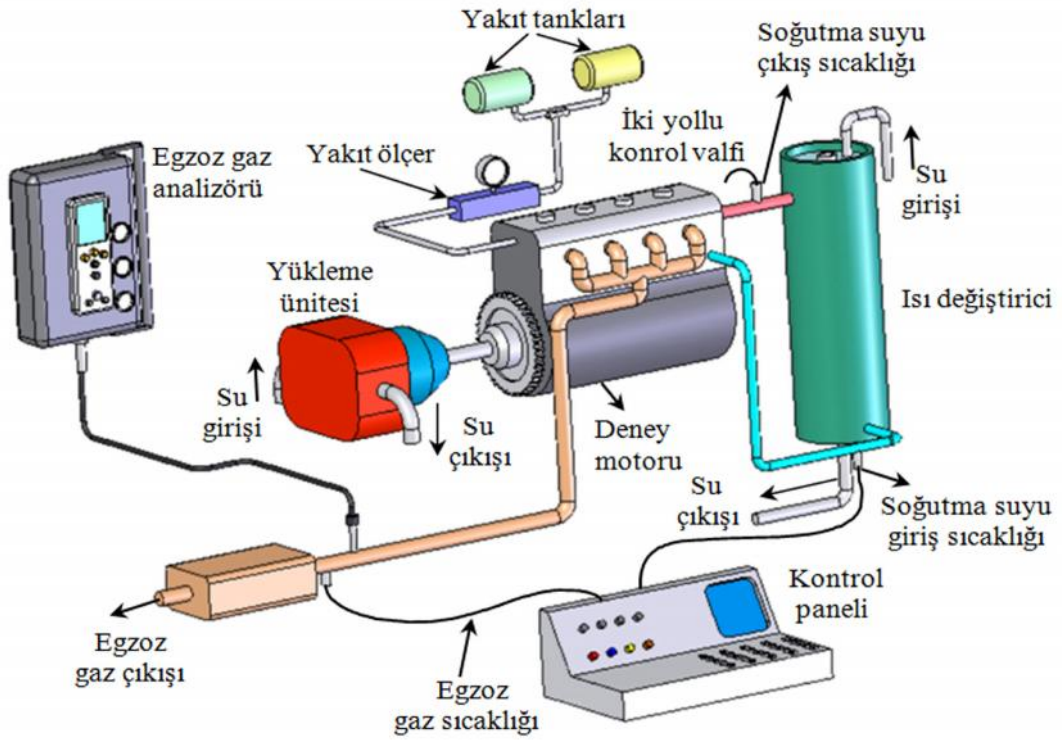
5.1.7 Motor Test Düzeneği

En düşük sıcaklık değeri olan $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ için çizilen üç bileşenli faz diyagramındaki faz ayrışmasının olmadığı (çözünür) alandan seçilen üç bileşenli farklı oranlardaki konsantrasyonların, dizel motoru performansı ve egzoz emisyonlarına etkilerini incelemek için motor test düzeneği kullanılmıştır.

Motor test düzeneği, deney motoru, motor test cihazı, yakıt ölçer, ısı değiştirici, nem ve sıcaklık ölçer ve egzoz gazı analiz cihazından oluşmaktadır. Motor test düzeneğinin genel görünümü Şekil 5.7’de, Şematik görünümü Şekil 5.8’de verilmiştir.



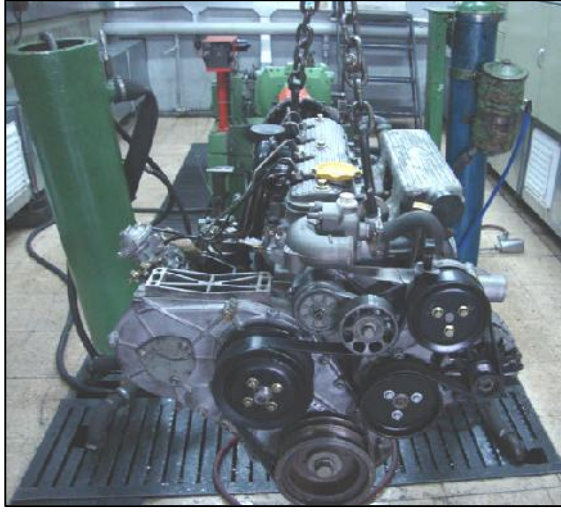
Şekil 5.7: Motor test düzeneğinin genel görünümü



Şekil 5.8: Motor test düzeneğinin Şematik görünümü

5.1.7.1 Deney Motoru

Motor test düzeneğinde deney motoru olarak Land Rover marka dört silindirli, direkt püskürtmeli, turboşarjlı ve ara soğutmalı dizel motoru kullanılmıştır. Deney motoruna yenileştirme işlemi uygulanmış ve rodaj devresi tamamlanmıştır. Deneyde kullanılan motorun genel görünümü Şekil 5.9’da, teknik özellikleri Tablo 5.1’de verilmiştir.



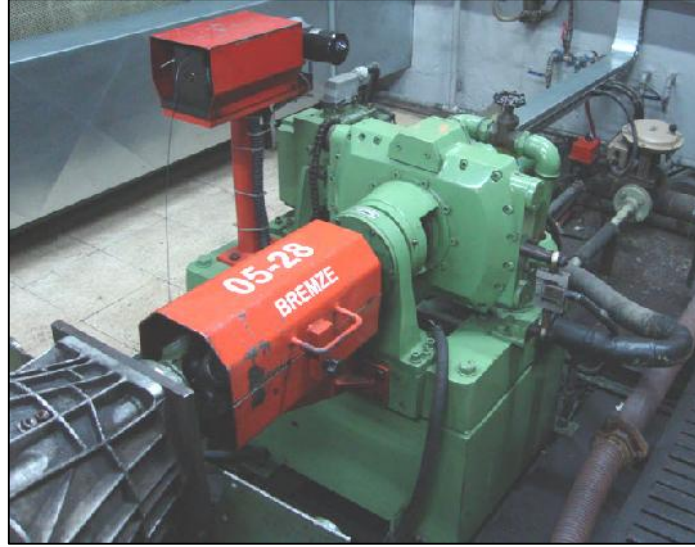
Şekil 5.9: Deney motorunun genel görünümü

Tablo 5.1: Deney motorunun teknik özellikleri

Markası	Land Rover
Püskürtme sistemi	Direkt püskürtmeli
Silindir sayısı	4 Sıra tipi
Silindir çapı	90,47 mm
Strok	97,00 mm
Hacim	2495 cc
Sıkıştırma oranı	19,5:1
Maksimum moment	235 Nm (2200 d/dk.)
Maksimum güç	82 kW (3800 d/dk.)
Motor rölanti devri	720 d/dk. (±20)
Maksimum motor devri	4400 d/dk. (+ 40, -20)
Besleme tipi	Turboşarjlı
Turboşarj Basıncı	Tam yükte (2500 - 3000 d/dk.) 0,8-1 bar
Enjeksiyon Pompası	Bosch Rotary R509
Regülatör Tipi	Mekanik
Enjektör Tipi	Bosch KBAL90P37
Püskürtme zamanı	15° Ü.Ö.N önce
Püskürtme basıncı	200 bar
Supap düzenlemesi	I tipi-üstten kamlı
Yağlama sistemi ve basıncı	Tam basınçlı yağlama / 1,76 -3,86 kgf/cm ²
Soğutma sistemi	Su ile soğutmalı

5.1.7.2 Motor Test Cihazı

Motor performans değerlerinin tespitinde, maksimum gücü 119 kW ve maksimum devri 7500 d/dk. olan BT-190 model sulu tip motor test cihazı kullanılmıştır. Motor test cihazının genel görünümü Şekil 5.10'da, teknik özellikleri Tablo 5.2'de verilmiştir.



Şekil 5.10: Motor test cihazının genel görünümü

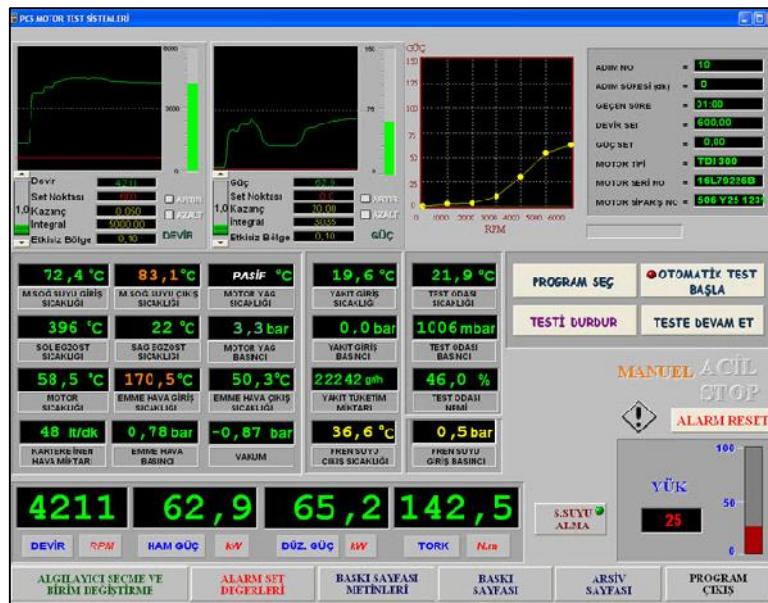
Tablo 5.2: Motor test cihazının teknik özellikleri

Fren modeli	BT- 190
Maksimum frenleme gücü	119 kW
Maksimum devir	7500 d/dk.
Maksimum moment	745 Nm
Yük hücresi kapasitesi	2500 N
Maksimum güç için su ihtiyacı	2,4 m ³ /h
Fren suyu basıncı	1-2 kg/cm ²
Maksimum fren suyu çıkış sıcaklığı	60 °C
Su girişi	1 1/4"
Su çıkışı	2 1/2"
Fren kontrol tipi	Kayıcı fan perdeleri ile
Ağırlık sistemi	Metrik-elektronik yük hücresi
Fan adedi	1
Elektrik ihtiyacı	220/380 V. 50 Hz. 3 faz
Dönüş yönü	Sağ dönüşlü

Motor test cihazının bağlı olduğu kontrol paneli Şekil 5.11’de görülmektedir. Kontrol paneli üzerinde ve test odasındaki monitörler yardımıyla (Şekil 5.12); krank mili devri (rpm), gücü (kW) ve momenti (Nm), emme hava basıncı (bar), fren suyu çıkış sıcaklığı (°C) ve giriş basıncı (bar), motor sıcaklığı (°C), emme hava giriş ve çıkış sıcaklıkları (°C), yakıt tüketim miktarı (g/h), egzoz gaz sıcaklığı (°C), motor yağ sıcaklığı (°C) ve basıncı (bar), motor soğutma suyu giriş ve çıkış sıcaklıkları (°C), test odası sıcaklığı (°C), basıncı (bar) ve nemi (%), yakıt giriş basıncı (bar) ve sıcaklığı (°C) okunabilmektedir. Ayrıca, kontrol paneli üzerindeki düğmeler yapılan deneylerin otomatik veya manuel olarak ayarlanabilmesine imkân vermekte, diğer düğmeler ise motoru çalıştırmak veya stop ettirmek, motoru yüklemek veya yükünü azaltmak, gaz vermek veya azaltmak için kullanılmaktadır.



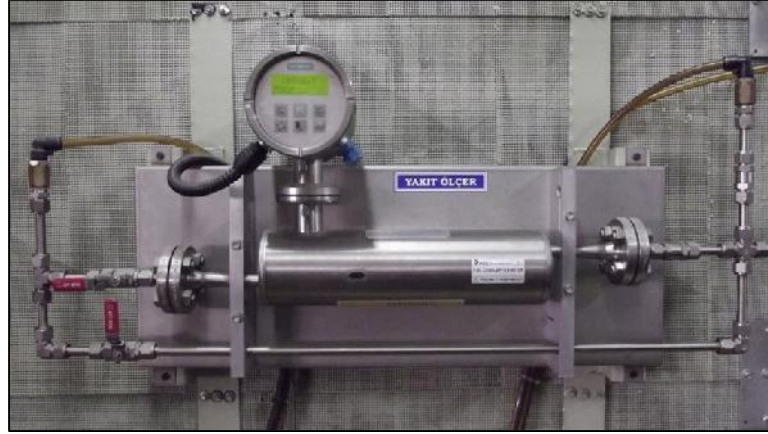
Şekil 5.11: Kontrol paneli



Şekil 5.12: Ekran görüntüsü

5.1.7.3 Yakıt Ölçer

Deneyleerde Siemens Sitrans F C Massflo marka (sensor MASS 2100 versiyon DI 25), MASS 6000 Ex-d transmitter yakıt ölçer kullanılmıştır. Kullanılan yakıt ölçer kütleli (kg/s) ve hacimsel (l/s) olarak ölçüm yapabilmektedir. Yakıt ölçerin genel görünümü Şekil 5.13'te, teknik özellikleri Tablo 5.3'te verilmiştir.



Şekil 5.13: Yakıt ölçerin genel görünümü

Tablo 5.3: Yakıt ölçerin teknik özellikleri

Versiyon	DI 25
İç boru çapı (mm)	29,7
İç boru kalınlığı (mm)	2
Kütleli akış ölçüm aralığı (kg/h)	0-25,000
Yoğunluk aralığı (g/cm ³)	0-2,9
Hassasiyeti (%)	± 1
Sıcaklık (°C)	-50 ile +180
Sıvı ölçüm boru basıncı (bar)	110
Malzeme	1.4435/1.4404 Paslanmaz çelik
Ağırlık (kg)	48

5.1.7.4 Isı Değiştirici

Deneylerde motorun soğutulabilmesi için motorun dışında bulunan bir ısı değiştirici kullanılmıştır. Isı değiştirici Şekil 5.14'te görülmektedir. Motor soğutma suyu giriş ve çıkış sıcaklıkları kontrol paneli üzerindeki ekrandan ayarlanabilmektedir. Motor soğutma suyunun giriş ve çıkış sıcaklık değerleri ayarlandıktan sonra dijital termometre st sıcaklık limit kontağı, selenoid valfe kumanda etmekte ve sıcak suyla karışması için su tankından taze soğuk su dolmaktadır. Taze soğuk su dolumu, soğutma suyunun alt limitine ulaşıncaya kadar devam etmektedir. Fazla su bir boru vasıtasıyla tekrar su tankına geri dönmektedir.

Termometre ift kontaklı ve dijital olup, ısı değiştirici üzerine değil, kontrol paneli üzerine yerleştirilmiştir. Sıcaklık algılayıcı PT-100 tank üzerindedir ve bir kablo vasıtası ile termometreye bağlanmıştır. Deneyler esnasında soğutma suyunun giriş ve çıkış sıcaklık değerleri 85-90 °C olarak ayarlanmıştır.



Şekil 5.14: Isı değiştirici

5.1.7.5 Nem ve Sıcaklık Ölçer

Motor test cihazı tarafından tespit edilen ham gücün test odası nemi ve sıcaklığına bağlı olarak düzeltilmesi için test odasının basıncı, nemi ve sıcaklığının tespitinde HT-785 marka basınç, nem ve sıcaklık ölçeri kullanılmıştır. Atmosfer basınç, sıcaklık ve nem ölçerin genel görünümü Şekil 5.15'te, teknik özellikleri Tablo 5.4'te verilmiştir.



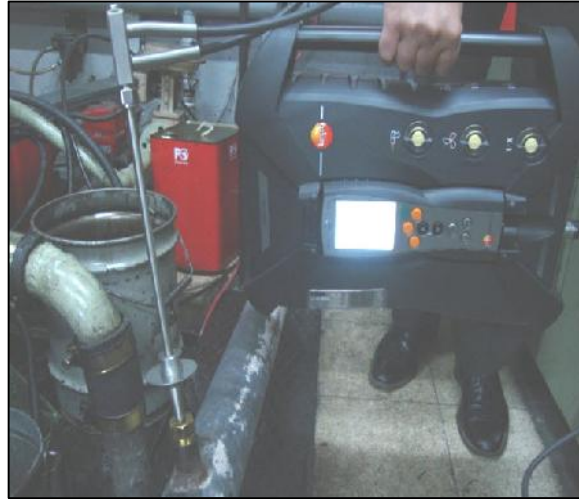
Şekil 5.15: Atmosfer basınç, sıcaklık ve nem ölçer

Tablo 5.4: Atmosfer basınç, sıcaklık ve nem ölçerin teknik özellikleri

Nem ölçer	
Ölçme aralığı	% 0-100 RH
Çalışma aralığı	%10-90 RH
Doğruluk (23 °C'de)	± %3 RH
Stabilite (RH/yıl)	± %1
Çalışma sıcaklığı (°C)	-20 ile +60
Sıcaklık ölçer	
Ölçüm aralığı (°C)	0-100
Doğruluk	± 0,3 °C

5.1.7.6 Egzoz Gazı Analiz Cihazı

Egzoz emisyon değerlerinin tespit edilmesinde, Testo 350 marka gaz analizör cihazı kullanılmıştır. Portatif taşınabilir gaz analizör cihazı üzerinde kablosuz erişimi sağlayan ve ölçülen emisyon değerlerini gösteren bir elle kumanda cihazı ve bu verilerin çıktısını almak için ayrı bir kablosuz yazıcı bulunmaktadır. Ayrıca, ölçülen emisyon değerleri gaz analiz cihazının bilgisayar bağlantısı ile işlenebilmektedir. Gaz analiz cihazı genel görünümü Şekil 5.16’da, teknik özellikleri Tablo 5.5’te verilmiştir.



Şekil 5.16: Gaz analiz cihazı genel görünümü

Tablo 5.5: Gaz analiz cihazı teknik özellikleri

Bileşenler	Ölçüm aralığı	Hassasiyet	Çözünürlük
O ₂	0...25 Vol.%	±0,2 Vol.%	0,01 Vol.%
C _x H _y	100...40000 ppm	< 10 % mv (> 4000 ppm)	10 ppm
CO, H ₂ -komp.	0...10000 ppm	±10 ppm (0...199 ppm)	1 ppm
NO	0...4000 ppm	±5ppm (0...99ppm)	1 ppm
NO ₂	0...500 ppm	±5 ppm (0...99,9 ppm)	0,1 ppm
H ₂ S	0...300 ppm	±2 ppm (0...39,9 ppm)	0,1 ppm
CO ₂ -(IR)	0...50 Vol.%	±0,3Vol.%	0,01 Vol.%
HC	100...40000 ppm	±400 ppm (100...4000 ppm)	10 ppm
λ	1,0-99,9	0,01	± 2,0 %

5.1.8 Deney Tasarımı Programı

En düşük sıcaklık değeri için çizilen faz diyagramına göre optimum üçlü karışım oranının belirlenmesi maksadıyla, deney tasarımı aşamasında ve bu tasarıma ile gerçekleştirilen motor performans ve egzoz emisyon deneylerinin çıktı değerlerine göre yapılan analiz çalışmasında Minitab 16 paket programı kullanılmıştır.

5.1.9 Yüzey Grafikleri Çizdirme Programı

Deney tasarımı ile gerçekleştirilen deneyler sonucunda motor performans ve egzoz emisyon çıktı parametrelerinin her biri için oluşturulan matematiksel model yardımıyla yüzey grafiklerinin (contour plots) çizilmesinde MATLAB R2010b paket programı kullanılmıştır.

5.2 Yöntem

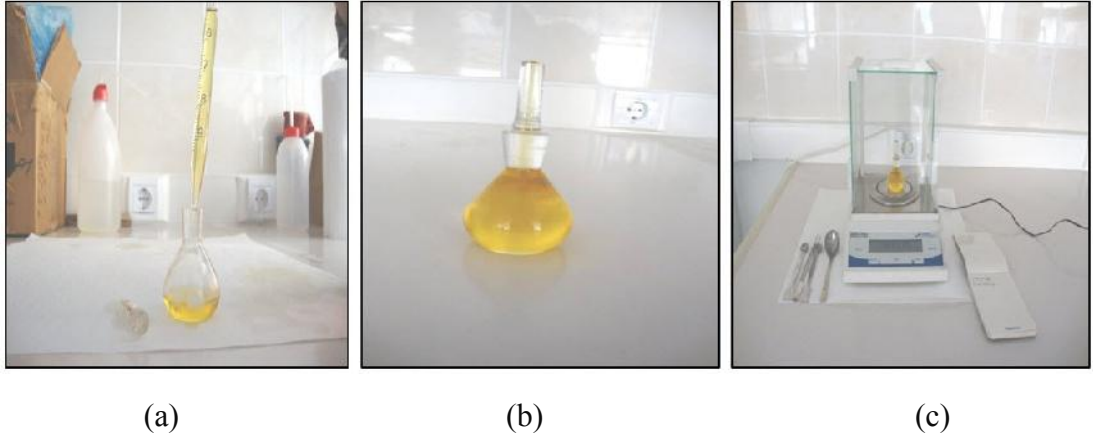
Bu tez kapsamında, euro dizel yakıtı, n-bütanol ve nötr pamuk yağı bileşenlerinin birbiri ile olan çözünürlük ilişkilerinin belirlenmesi için mikroemülsiyon yöntemiyle yapılan laboratuvar çalışması, motor test düzeneğinde motor performansı ile egzoz emisyon testleri ve tüm deney sonuçlarının değerlendirildiği istatistiksel analiz çalışması gerçekleştirilmiştir. Tez çalışmasında kullanılan yöntemler sırasıyla açıklanmıştır.

5.2.1 Bileşen Yoğunluklarının Ölçülmesi

Bir maddenin yoğunluğu (ρ), kütlelerinin (m), hacmine (v) olan oranıdır. Üç bileşenin birbirleriyle olan çözünürlük ilişkisinin belirlenmesi için yapılan titrasyon işleminde ve yakıt karışımlarının alt ısıl değerlerinin hesaplanmasında yakıt bileşenlerinin yoğunluklarının bilinmesi gereklidir.

Bu maksatla laboratuvar ortamında oda sıcaklığında euro dizel yakıtı, n-bütanol ve nötr pamuk yağının yoğunlukları 25 ml'lik boot tipi piknometre yardımıyla ASTM D941, D1217 ve DIN 51 757 standartları referans alınarak

ölçülmüştür [148]. Piknometre ile yoğunluk ölçme işlemi Şekil 5.17’de görülmektedir.



Şekil 5.17: Piknometre ile yoğunluk ölçme işlemi

(a) Doldurma, (b) Kapatma ve (c) Ölçme işlemi

İlk önce piknometrenin hacminin belirlemek için 0,1 mg duyarlılığındaki hassas terazide boş ağırlığı ölçülmüştür, daha sonra saf su hava kabarcığı olmaksızın yavaşça cam pipet yardımıyla piknometreye ağzına kadar doldurularak kapağı kapatılmıştır. İçi saf su dolu piknometre tekrardan tartılarak dolu ağırlık kaydedilmiştir. Bu işlem üç kez tekrarlanmıştır. Her bir dolu ağırlık değerinden boş ağırlık değeri çıkarılmış, sonuçların ortalaması alınarak saf suyun ağırlığı kaydedilmiştir. Sıcaklığa bağlı su yoğunluğu tablosundan 24 °C’deki saf suyun yoğunluğu esas alınarak $\rho=m/v$ eşitliğinden piknometrenin gerçek hacmi bulunmuştur.

Daha sonra sırasıyla tüm euro dizel yakıtı, n-bütanol ve nötr pamuk yağı için aynı işlem sırası takip edilerek piknometrenin gerçek hacmi bilindiğinden g/ml cinsinden bilşenlerin yoğunlukları ölçülmüştür.

5.2.2 Çözünürlük ve Mikroemülsiyon Yöntemi

Dizel motorlarda kullanılan biyoyakıtlar ile ilgili yapılan çalışmaların çoğunu farklı yağlardan değişik yöntemlerle biyoyakıt üretilmesi ve üretilen yakıtı dizel motorlarda deneme çalışmaları oluşturmaktadır. Bu çalışmalarda üretilen biyoyakıtın yakıt özellikleri ve motor performansları dizel yakıtı ile karşılaştırılmıştır. Bitkisel

yağlardan biyoyakıt üretilmesinde seyreltme (karışım), proliz, transesterifikasyon ve mikroemülsiyon yöntemleri kullanılmaktadır. Bu yöntemlerden en çok kullanılan transesterifikasyon yöntemiyle biyodizel üretimidir. Biyoyakıtların düşük sıcaklıklarda kararlılığını koruması dizel motor yakıt sistemi için önemli bir özelliktir. Ayrıca, bir yakıtın dizel motorunda kullanılabilmesi için dizel yakıtına benzer olarak kararlı bir hal sergilemesi, soğuk akış özellikleri bakımından dayanıklı olması ve berrak bir görünüm sergilemesi gerekmektedir [58,95,98,99,150].

Ancak transesterifikasyon yöntemiyle üretilen biyodizel yakıtının doğrudan veya dizel yakıtı ile karıştırılarak kullanılmasında 0 °C'nin altındaki düşük sıcaklıklarda sergilediği soğuk akış özellikleri dizel motor için olumsuzluk yaratmaktadır. Düşük sıcaklıktaki tam karışım oluşturamama ve zayıf olan yakıt kararlılığı biyoyakıtın bünyesindeki yapışkanları ve tortuları artırarak yakıt filtresinin tıkanmasına neden olabilmektedir. Bu durum bitkisel yağlardan üretilen biyodizelin geniş kullanımını sınırlandırmaktadır [16,21,25,32-34].

Yapılan çalışmalarda daha çok biyodizel ile dizel yakıtı karışımlarının yakıt kararlılığı açısından dayanımı yani faz ayrışması olup olmadığı belirli oranlarda etanol ile karıştırılarak test edilmiştir. Bu çalışmalarda etanolün de bir süre sonra karışımın kararlılığını bozarak faz ayrışması sergilediği belirtilmiştir [40,58,91,132,149,151].

Bitkisel yağlardan biyoyakıt üretilmesinde etkili yöntemlerden biri olan mikroemülsiyon yönteminde normalde karışmayan iki sıvının karışmasını sağlamak için ortak çözücü katkı maddesi olarak bütanol, oktanol ve hekzanol gibi çözücüler kullanılarak karışımların çözünürlük oranları belirlenebilmektedir. Bitkisel yağlarla karıştırılan bu çözücüler ile hem düşük sıcaklıklarda faz kararlılığı sağlanabilmekte hem de dizel motoru için gerekli viskozite değeri karşılanmaktadır [1,15-20,34,99].

Biyoyakıtların dizel yakıtı ile hangi şartlarda nasıl tam olarak karışabileceği ve hangi şartlarda kararlı bir halde kalabileceği, bileşenlerin sıcaklığa bağlı olarak birbiri içinde çözünme özelliklerinin bilinmesi ve test edilmesi ile mümkün olmaktadır.

5.2.2.1 Bileşenlerin Çözünürlük İlişkisi

Bir maddenin belli bir çözücünün belli bir miktarında, belli basınç ve sıcaklıkta çözünebilen en fazla miktarına o maddenin çözünürlüğü denir. Çözünürlüğe sıcaklık etki etmektedir ancak basıncın sıvıların çözünürlüğüne önemli bir etkisi yoktur [152].

Biyoyakıt tasarlanmasında kullanılan bileşenlerin birbiri ile olan çözünürlük ilişkileri, sıcaklığa bağlı olarak karışımların kararlılığını belirlemektedir. İki ya da daha fazla kimyasal maddenin herhangi bir oranda bir araya gelerek oluşturdukları homojen karışım çözelti olarak tanımlanmaktadır. Bu noktada euro dizel yakıtı, n-bütanol ve nötr pamuk yağı karışımı bir çözeltilerdir. Bir çözeltiyi oluşturan maddelerden genellikle çok olanına çözücü, çözücüye göre daha az miktarda bulunan çözelti bileşenine ise çözünen denir. Bir maddenin başka bir madde içerisinde gözle görülemeyecek kadar küçük taneciklere homojen olarak ayrışması olayı da çözünme olarak tanımlanmaktadır [152].

Çözücü ile çözünenin birbiri içinde homojen olarak karışması ile çözünme olayı gerçekleşir. Çözünme moleküller arasındaki çekim kuvvetine dayanır. Bir çözücünün başka bir maddeyi çözebilmesi için çözücü ile çözünen molekülleri arasındaki çekim kuvvetlerinin, çözücü ve çözünenin kendi molekülleri arasındaki çekim kuvvetinden daha büyük olması gerekir [152]. Genellikle çözünme olayı, çözücü ile çözünenin benzer yapıda olmaları ile gerçekleşir. Bu durum kimya bilim dalında “**benzer benzeri çözer**” şeklinde ifade edilmektedir.

Polar ve Apolar Moleküller

Bir molekül farklı atomlardan meydana gelmişse her bir atomun elektronlara ilgisi farklı olmaktadır. Bunun sonucu olarak molekülün bir kısmında elektron fazlalığı ve kısmi negatif yük, bir kısmında ise elektron eksikliği ve kısmi pozitif yük görülür. Bu şekildeki moleküllere **polar** molekül denir. Elektron dağılımında kutuplaşma göstermeyen moleküllere de polar olmayan yani **apolar** molekül denir.

Kimya alanında çözücü özelliğini belirlemede genellikle su kullanılmaktadır. Su molekülünde oksijenin bulunduğu kısım negatif, hidrojenin bulunduğu kısım

kısmen negatiftir. Bu durumda su polar bir moleküldür. Çözücü ve çözünen maddelerin molekülleri birbirine ne kadar çok benzer ise çözünürlük o kadar yüksektir. Polar bileşiklerde moleküller arası çekim kuvveti oldukça kuvvetlidir. Molekülün negatif yüklü kısmı öteki molekülün pozitif yüklü kısmı tarafından çekilir. Böylece bütün moleküller arasında bir bağ yapısı kurulur. Apolar bir molekül, polar bir moleküldeki bu bağ yapısını bozarak çözemez. Yani polar yapıdaki bir madde ancak polar çözücülerde, apolar bir madde ise ancak apolar çözücülerde çözünür.

Yapısında bulunan çoklu atomlardan oluşan moleküller arasında elektronlar dengeli bir şekilde dağılım gösterebiliyor ve molekülün herhangi bir ucunda kısmi olarak artı ya da eksi yüklü olma durumu gözlemlenmeyen moleküller apolar yapıya sahiptirler. Bu yapıya uygun HC ve CO₂ molekülleri örnek olarak verilebilir. Bitkisel yağlar (C_nH_mO) ve dizel yakıtı (C_nH_m) apolar yapıya sahip moleküllerdir [95]. Bitkisel yağların yüksek viskoziteleri ve kısa zincirli yapısında oksijen bulunması nedeniyle dizel motorlarında doğrudan kullanımında aşındırıcı etki başta olmak üzere çeşitli dezavantajları bulunmaktadır [14-18]. Bu nedenle kısa süreli uygulamalarda dizel yakıtı ile karışım oluşturma şeklinde kullanılabilir.

Bitkisel yağlar ile dizel yakıtı apolar moleküller yapıya sahip olmalarına rağmen, bitkisel yağların dizel yakıtı ile karışımlarında bitkisel yağın yapısında yüksek miktarda bulunan asit, fenol, eter, keton, aldehit ve ester gibi polar bileşenlerin dizel yakıtının yapısında bulunan parafin, nafta ve aromatik gibi apolar yapıdaki bileşenler ile tam olarak karışma sağlayamamakta ve düşük sıcaklıklarda faz ayrışması gerçekleşmektedir [95]. Bundan dolayı bitkisel yağ ile dizel yakıtı karışımında homojen bir faz oluşturmak için bir katkı maddesinin kullanılması ve kullanılacak katkı maddesinin bitkisel yağ ile dizel yakıtı karışımını uzun süre kararlı halde tutacak ortak çözücü özelliğinin de olması gerekmektedir.

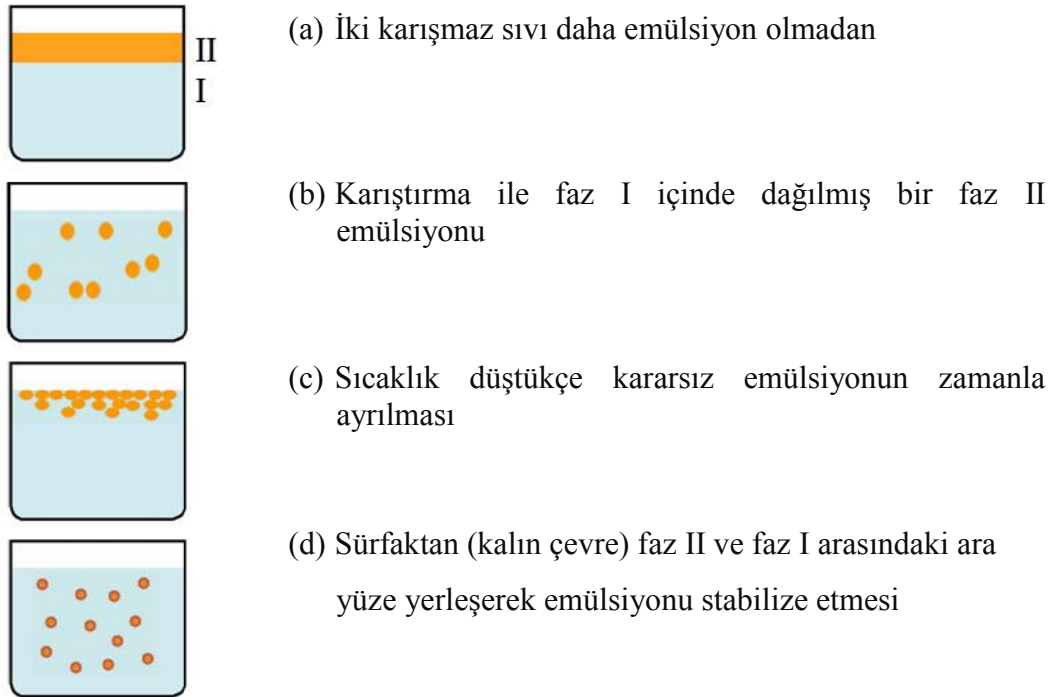
Gerek çözücü gerekse çözünen moleküllerinin özellikleri iki uç özellikten ne kadar farklı ise, çözünürlük o ölçüde değişir. Bazı çözücü molekülleri polarlık ve apolarlık özelliklerini birlikte gösterebilirler. Yapılan çalışma kapsamında alkol bileşeni olarak seçilen n-bütanol böyle bir moleküldür. Molekülün karbon-hidrojen ve karbon-karbon bağları apolar, oksijen-hidrojen ve karbon-oksijen bağları ise polar özelliktedir. Alkolün hidrokarbon kısmı hidrofobiktir, yani su moleküllerini

itmektedir. Hidrokarbon kısmının uzunluğu artıkça alkolün polar moleküler yapıdaki çözünürlüğü azalmaktadır. Buna göre, metanol ve etanol suyla yeteri kadar karışabildikleri halde n-bütanolün ancak 8,3 gramı 100 ml suda çözünebilmektedir. Buna göre n-bütanol hem polar hem de apolar maddeler için iyi bir çözücüdür ve ortak çözücü (co-solvent) olarak adlandırılmaktadır [35,48,49,77,81,89,91,95,153].

5.2.2.2 Mikroemülsiyon Yöntemi

Emülsiyon birbiri içinde çözünmeyen iki sıvının karışımı olarak tanımlanmaktadır. Emülsiyonlar kararlı değildir ve kendiliğinden oluşmazlar. Emülsiyon oluşumu için karıştırma, çalkalama, homojenizasyon veya spreyleme gibi bir işlemle karışıma enerji vermek gerekir. Zaman içinde veya sıcaklığa bağlı olarak emülsiyonu oluşturan fazların kararlı hallerine geri dönme eğilimi vardır.

Bir maddenin kimyasal bileşiminin ve fiziksel halinin her noktasında aynı olduğu bölgeye o maddenin bir fazı denmektedir. Şekil 5.18'de görülen emülsiyon oluşturma sürecinde yüzey etkin bileşikler (sümfaktanlar) emülsiyonların faz kararlılığını artırmaktadır [153-156].



Şekil 5.18: Emülsiyon oluşturma süreci

Emülsiyonlar termodinamik olarak dayanıksızdır. Fiziksel olarak dayanıklı bir emülsiyon dağılmış olan fazda uzun süreli beklemede hiçbir ayrılma göstermemeli, az bir çalkalanma ile homojen olarak ilk durumuna gelebilmeli ve kolaylıkla akabilmelidir. Dizel yakıtı ile bitkisel yağ karışımlarında karışımın kararlı bir halde durması için motorda ön ısıtıcı kullanma gibi yapısal değişikliklere gerek duyulmaktadır. Ayrıca, dizel motorda kullanılacak bitkisel yağ karışımlarındaki karışım oranı da bu nedenle düşük tutulması gerekmektedir.

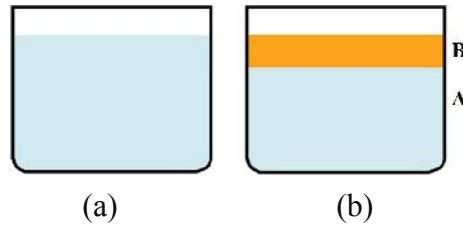
Mikroemülsiyon ise termodinamik olarak dayanıklı, düşük viskoziteli, saydam, çok küçük damlacık büyüklüğüne sahip boyutları 5-150 nm arasında ve optikçe izotropik sıvı mikro yapılarının denge dağılımı olan ve kendiliğinden oluşan sistemlerdir. Dışarıdan enerji vermeye gerek yoktur. Mikroemülsiyonların içinde ortak çözücü (co-solvent) bulunmaktadır. Dağılmış fazı oluşturan taneciklerin küçük boyutları nedeniyle mikroemülsiyonlar ve nanoemülsiyonlar berrak görünürler. Sıvılar için birbirleriyle kısmen karışabilen ikili sistemleri üçüncü bir sıvı bileşen yardımıyla homojen olarak bir arada tutan, karışımın kararlılığını ve dayanıklılığını sağlayan sistemler mikroemülsiyon sistemleridir [58,155,156].

Bitkisel yağların dizel motorlarında alternatif yakıt olarak kullanılması için bitkisel yağların yüksek viskozitelerini azaltan yöntemlerden biri olan mikroemülsiyon yönteminde alkol kullanılarak emülsiyon gibi normalde karışmayan iki sıvının kararlılığı sağlanabilmektedir ve sıcaklık düşmesine rağmen karışımlar kararlılığını korumaktadır.

Bitkisel yağların viskozitesini düşürmek için, metanol veya etanol gibi kısa zincirli alkollerle mikroemülsiyon oluşturulmaktadır. Böylece viskozite değeri düşmektedir. Bu yöntemle petrolden tamamen bağımsız alternatif dizel yakıtları meydana getirmek mümkün olabilmektedir. Ayrıca, bu yöntemle elde edilen yakıtların viskozitelerinde azalmalar ve püskürtme karakteristiklerinin iyileşmeler gibi olumlu sonuçlar kaydedilmiştir [58]. Mikroemülsiyon sayesinde biyodizel üretiminin olumsuz etkileri ve biyodizelin düşük sıcaklıklardaki kötü yakıt özellikleri ortadan kalkmaktadır [154].

Mikroemülsiyonlarda Faz Oluşumu

Faz sadece kimyasal bileşim bakımından değil, aynı zamanda fiziksel yönden de üniform olan bir madde halini belirtir [152]. Faz ayrımının meydana gelme nedeni, sistemi oluşturan bileşenlerin birbirini içinde çözünebilecekleri sınır değerlerinin aşılmasıdır. Sıcaklığa bağlı olarak bu değer değişebilir. T sıcaklığında az miktarda B sıvısının diğer bir A sıvısına katıldığında, B sıvısı A'da tamamen çözüldüğü zaman, ikili sistem tek faz haline gelir. B ilave edilmeye devam edilirse daha fazla çözünmenin olmadığı bir noktaya gelinir. Bu anda sistem birbiri ile dengede olan Şekil 5.19 (b)'deki gibi iki fazdan meydana gelir [99].



Şekil 5.19: Karışımın fiziksel görünüşü

(a) Tek faz, (b) İki faz

Faz sayısının ikiye çıkması ise değişik şekillerde gözlemlenebilir. Örneğin bulanıklık olması sistemde iki faz oluştuğunun bir göstergesidir.

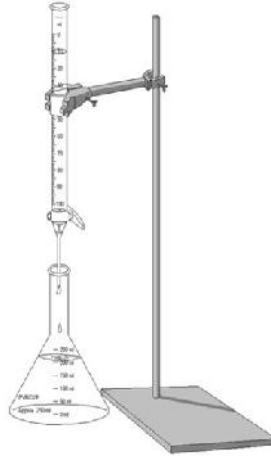
Üç bileşenden oluşan bir mikroemülsiyonun hazırlanmasında en önemli basamak üçgen faz diyagramının çizilmesi ve buradan hareketle en uygun mikroemülsiyon alanının, dolayısıyla karışım yapılacak bileşenlerin optimum miktarlarının saptanmasıdır. Üçgen faz diyagramları genel titrasyon deneyi ile belirlenebilmektedir. Belirli yüzdelerde hazırlanan ikili karışımın üçüncü bileşen ile titre edilmesiyle dayanıklı ve berrak (tek faz) kaldığı konsantrasyon belirlenmektedir.

Euro dizel yakıtı, nötr pamuk yağı karışımının düşük sıcaklıklarda kararlı bir faz sergilemesi için hem euro dizel yakıtı hem de pamuk yağı ile ortak çözücü özelliği sayesinde her oranda karışabilen ve uzun zincirli bir alkol olan n-bütanolün kullanıldığı üç bileşenli mikroemülsiyonda, karışımların sıcaklığa bağlı olarak tek faz sergilediği üçlü konsantrasyonlar titrasyon deneyi ile belirlenmiştir.

5.2.2.3 Titrasyon Deneyi

Titrasyon işlemi, belli hacimde derişimi bilinen bir bileşeni, derişimi bilinmeyen çözeltiliye ilave ederek yapılan nicel kimyasal analiz işlemidir. Üç bileşenin çözünlük noktalarının tayini için çözeltili hazırlama, nokta tayini gibi kimyasal işlemlerde yaygın olarak kullanılan analitik bir yöntemdir. Titrasyon işlemi, belli hacimde derişimi bilinen bir bileşeni derişimi bilinmeyen çözeltiliye ilave edilerek yapılmaktadır [58,99,154,157].

Titrasyon düzeneğinde bulunan bürete standart yani derişimi bilinen çözeltili konur ve bu çözeltiliye titrant denir. Bürete doldurulan standart çözeltili, analizi yapılacak çözeltiliye damla damla ilave edilir. Titrasyon düzeneğinin şematik görünümü Şekil 5.20’de görülmektedir. Bu sırada analiz çözeltilisinin bulunduğu erlen çalkalanarak karışma sağlanır. Gözleme dayalı olarak homojen yani tek faz gözlenince işleme son verilir. Bu işleme titre etmek (titrasyon) denir [157].



Şekil 5.20: Titrasyon düzeneği şematik görünümü

Tez çalışması kapsamında yapılan titrasyon deneyinde birbiri ile kısmen karışan iki sıvı euro dizel yakıtı ile nötr pamuk yağı ve bu sıvıların her ikisiyle de karışabilen üçüncü bir sıvı olan n-bütanol arasındaki sabit basınçta, değişen sıcaklığa bağlı olarak birbirleri içerisinde çözünlük noktaları belirlenmiştir.

Tablo 5.6 incelendiğinde pamuk yağının viskozitesi, bulutlanma, akma ve soğukta filtre tıkanma noktasının euro dizel yakıtı ve n-bütanole göre çok yüksek

olduğu görülmektedir [14,16,21,48,74,82,103]. ASTM D975 ve D6751 standartlarına göre soğukta filtre tıkanma noktasının dizel ve biyoyakıtlar için yılın belirli aylarında farklı değerlerde olması gerekmektedir. Buna göre, 15 Nisan-30 Eylül arası 0 °C, 01 Ekim-15 Kasım arası -10 °C, 16 Kasım-28 Şubat arası -20 °C ve 01 Mart-14 Nisan arası ise -10 °C olarak verilmektedir [106]. Bu amaçla yapılan titrasyon deneyinde bileşenlerin soğuk akış özellikleri ile Ege ve Marmara bölgesi iklim koşulları dikkate alınarak oda sıcaklığı (24 °C), 5 °C, 0 °C, -5 °C ve -10 °C olmak üzere beş farklı sıcaklık seçilmiştir.

Tablo 5.6: Yakıt bileşenlerinin soğuk akış özellikleri

Yakıt	Viskozite (mm ² /s) 40 °C	Bulutlanma noktası (°C)	Akma noktası (°C)	Soğukta filtre tıkanma noktası (°C)
Euro dizel	2,21	-15	-33	-30
n-Bütanol	2,23	-	-89,5	< -51
Pamuk yağı	32,7	-1	-15	-10

İki farklı çözelti grubu için bu seçilen sıcaklıklarda titrasyon yapılmıştır. Birinci grupta pamuk yağı ile euro dizel yakıtı karışımları n-bütanol ile titre edilmiştir, ikinci grupta ise pamuk yağı-n-bütanol karışımları euro dizel yakıtı ile titre edilmiştir. İlk titrasyon deneyinin yapılışında kütleli olarak %10, %20, %40, %50, %70 ve %90 nötr pamuk yağı içeren Şekil 5.21'deki 20 g'lık nötr pamuk yağı ile euro dizel yakıtı karışımları hazırlanmıştır.

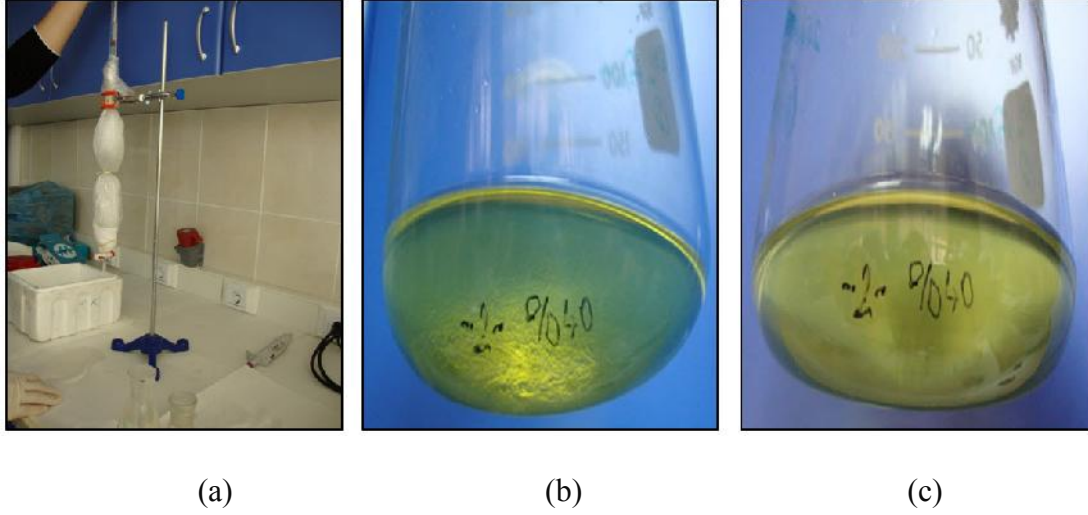


Şekil 5.21: 20 g'lık karışımlar



Şekil 5.22: Soğutulmuş karışımlar

Hazırlanan bu karışımlar soğutma banyosu cihazında tuz, buz karışımı yardımıyla titrasyon yapılan sıcaklığa getirilmiştir. -10 °C'ye soğutulmuş karışımlar Şekil 5.22'de görülmektedir. Daha sonra aynı sıcaklıktaki n-bütanol ile görsel olarak Şekil 5.19'da açıklanan tek faz yani berrak bir görünüm elde edilinceye kadar Şekil 5.23'te görüldüğü gibi titrasyon işlemi uygulanmıştır.



Şekil 5.23: (a) Titrasyon düzeneği, (b) Titrasyon işlemi, (c) Berrak görünüm

Titre edilen karışım aynı sıcaklıkta Şekil 5.24'te görüldüğü gibi sıcaklığı termometre ile kontrol edilmek suretiyle 5 dk. süreyle bekletilerek faz ayrışması olup olmadığı gözlenmiştir.



Şekil 5.24: Titre edilen karışımlar

Deneyler sonucunda faz ayrışmasının gerçekleşmediği çözünür noktaları temsil eden yeni üçlü karışım yüzdeleri hesaplanarak kaydedilmiştir. Bu işlem sırası tüm sıcaklık değerleri ve ikinci grup titrasyon için uygulanmıştır. Herbir sıcaklık için yapılan iki grup titrasyon işleminde faz ayrışması gerçekleştirilmeyen alanı belirleyen

12 farklı üçlü karışım yüzdesi elde edilmiştir. Tablo 5.7’de görüldüğü gibi 5 ayrı sıcaklık için faz ayrışması gerçekleştirilmeyen toplam 60 farklı karışım oranı tespit edilmiştir.

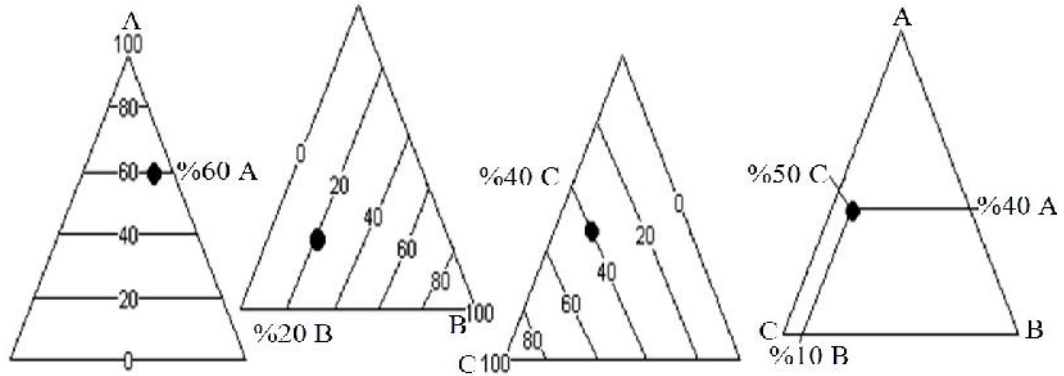
Tablo 5.7: Titrasyon deneyinde sıcaklığa bağlı konsantrasyonlar

Euro Dizel yakıtı (%)	n-Bütanol (%)	Pamuk yağı (%)	Titrasyon numarası	Euro Dizel yakıtı (%)	n-Bütanol (%)	Pamuk yağı (%)	Titrasyon numarası
(a) Oda Sıcaklığı (24 °C)				(ç) -5 °C			
1,63	88,53	9,84	1	0,01	90,29	9,7	1
1,53	78,77	19,7	2	5,18	75,85	18,97	2
1,95	58,83	39,22	3	7,01	56,39	36,6	3
1,00	37,00	62	4	9,62	45,19	45,19	4
2,00	17,00	81	5	5,70	28,3	66	5
2,00	5,00	93	6	8,75	12,03	79,22	6
1,60	2,05	96,35	7	27,48	8,42	64,1	7
24,56	1,47	73,97	8	44,80	8,4	46,8	8
44,05	2,86	53,09	9	55,57	7,39	37,04	9
59,06	1,57	39,37	10	73,15	7,56	19,29	10
79,52	0,60	19,88	11	84,89	5,79	9,32	11
88,85	1,28	9,87	12	92,00	0	8	12
(b) 5 °C				(d) -10 °C			
0,00	83	17	1	0,00	95	5	1
3,18	58,09	38,73	2	5,44	88,02	6,54	2
4,80	48,1	47,1	3	12,40	70,09	17,51	3
6,22	27,84	65,94	4	14,27	50,64	35,09	4
4,20	5,8	90	5	15,46	36,77	47,77	5
16,30	4,7	79	6	18,50	18,2	63,3	6
29,80	5,2	65	7	27,48	12,42	60,1	7
45,10	4,9	50	8	43,80	10,4	45,8	8
56,20	4,8	39	9	53,57	10,39	36,04	9
66,70	5,3	28	10	71,15	9,56	19,29	10
79,30	4,7	16	11	83,89	6,79	9,32	11
88,00	0	12	12	95,00	0	5	12
(c) 0 °C							
0,00	84	16	1				
4,04	74,16	21,8	2				
6,70	55,98	37,32	3				
6,70	48,15	45,15	4				
6,00	37	57	5				
5,30	27	67,7	6				
5,00	15	80	7				
10,00	7	83	8				
30,17	5,77	64,06	9				
49,50	5	45,5	10				
73,40	7,25	19,35	11				
91,00	0	9	12				

5.2.3 Üçlü Karışım Faz Diyagramının Çizilmesi

Üç bileşenli sistemlerin serbestlik dereceleri içerdikleri fazların sayılarına bağlı olarak değişir ve bu sistemlerde sıcaklık, basınç ve üç bileşenden herhangi ikisinin değişimi bağımsız değişkenleri oluşturmaktadır [152]. Bu durumda bir fazlı bölgeleri iki boyutlu uzayda, iki fazlı bölgeleri üç boyutlu uzayda ve üç fazlı bölgeleri ise dört boyutlu uzayda çizmek gerekmektedir. Çizim zorluğundan dolayı, üç bileşenli faz diyagramları genellikle sabit basınç ve sıcaklıkta çizilmektedir.

Sabit basınç ve sıcaklıkta üç bileşenli sistemlerin faz diyagramlarını iki boyutlu uzayda yani bir düzlem üzerine çizmek için eşkenar üçgen ya da ikizkenar üçgen şeklinde grafik çizimlerinden faydalanılmaktadır. Bu diyagramlara roozeboom diyagramları denilmektedir [152]. Üçgen faz diyagramının okunma yöntemi Şekil 5.25'te görülmektedir.



Şekil 5.25: Üçgen faz diyagramını okuma yöntemi

Sabit basınç ve sıcaklıkta, eşkenar üçgenin her bir köşesine bir bileşen saf olarak yerleştirilir ve üçgenin her bir kenarı 100 eşit parçaya bölünerek bileşenlerin yüzdesi mol, ağırlık veya hacimsel yüzde olarak ifade edilebilir. Eşkenar üçgenin köşelerine saat yönünün tersinde bileşenler yerleştirilir. Eşkenar üçgenin herhangi bir kenarında yer alan nokta iki bileşenli sistemi temsil etmektedir.

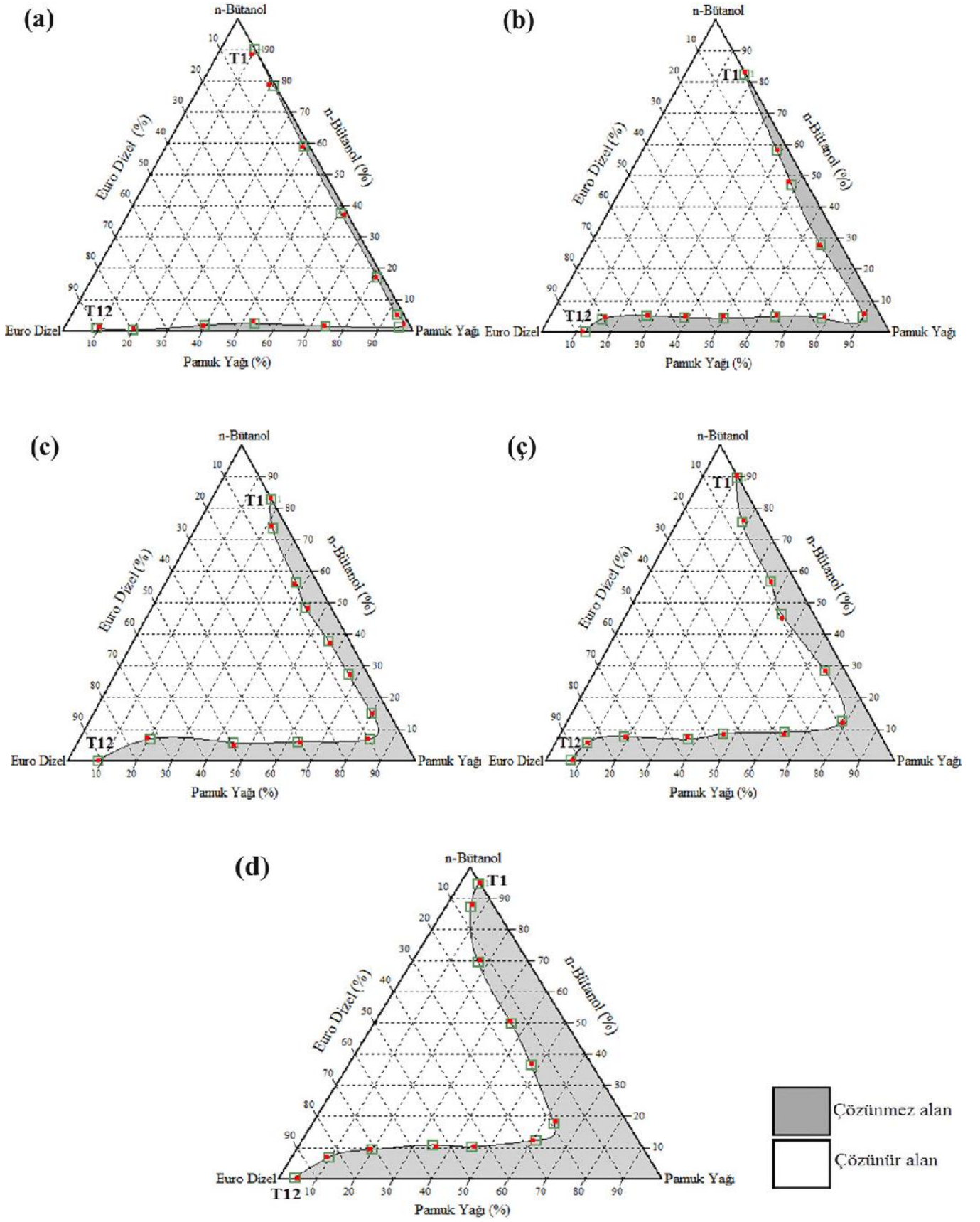
Buna göre eşkenar üçgenin AB kenarı üzerinde birinci ve ikinci bileşenlerin karışımı yani (A+B), BC kenarı üzerinde ikinci ve üçüncü bileşenlerin karışımı yani (B+C), CA kenarı üzerinde birinci ve üçüncü bileşenlerin karışımı yani (A+C) ikili karışımı bulunmaktadır. Bu karışımlar homojen veya heterojen olabilirler. Eşkenar

üçgenin içindeki herhangi bir nokta ise üç bileşenin karışım konsantrasyonunu göstermektedir.

Bileşenlerden ikisi birbiri içinde hiç çözünmedikleri ya da çok az çözündükleri halde, her iki bileşende de çözünür olan üçüncü bileşenin karışıma ilave edilmesiyle bu iki bileşenin birbiri içerisindeki çözünürlüğü artırılabilir. Karışan bileşenlerin birbiri içindeki çözünürlükleri değiştikçe faz diyagramlarının şekilleri de değişmektedir. Sabit basınç ve sıcaklıkta, birbiri ile dengede olan iki sıvı fazın faz diyagramı katı eğri ile belirtilmektedir. Eğrinin içerisinde daima iki faz ve dışında ise bir faz bulunmaktadır. Birbirleri ile dengede olan fazları birleştiren doğruya denge doğrusu adı verilir. Denge doğruları birbirine paralel olmayan doğrular olup, bu doğrular üzerinde alınan her noktanın bileşenler arasındaki etkileşmelere bağlı olarak üçgen faz diyagramında görülen heterojen bölgenin görüntüsü değişir. Yükselen sıcaklıkla bileşenlerin birbiri içindeki çözünürlükleri de artmakta ve heterojen bölge veya bölgeler daralmakta ya da tümüyle ortadan kalkmaktadır. Tersine, düşen sıcaklıkla yeni heterojen bölgeler ortaya çıkarak faz diyagramlarının şekilleri değişmektedir.

Çözünürlük sıcaklığa bağlı olduğundan sıcaklık değiştiğinde faz diyagramında görülen noktalarının yerleri de değişir. Bu nedenle, faz diyagramlarının hangi sıcaklıkta çizildiği kesin olarak belirtilmelidir. Bu tür sistemlere basıncın önemli bir etkisi olmamaktadır.

Bu kapsamda beş farklı sıcaklıkta yapılan titrasyon sonuçlarından elde edilen konsantrasyonlar ile CHEMIX School 3-50 programının “Ternary Plot” kısmında üçlü karışım faz diyagramları çizilmiştir. Her sıcaklık için ayrı, ayrı yapılan titrasyon deneylerinden elde edilen Tablo 5.6’da verilen T1 ile T12’nci titrasyon noktalarındaki her bir konsantrasyon değerinden ikisi girilerek (üçüncü bileşenin yüzdesi program tarafından hesaplanmaktadır) girilen değerlere göre noktalar program tarafından kırmızı ile işaretlenmektedir. Tüm değerler girildikten sonra ilk değerden itibaren sırayla son değere kadar noktalar işaretlendiğinde o sıcaklık değeri için faz diyagramları çizilmiş olmaktadır. Daha sonra eğrinin içi renklendirilebilmektedir. Beş farklı sıcaklık için çizilen üçlü karışım faz diyagramları Şekil 5.26’da görülmektedir.



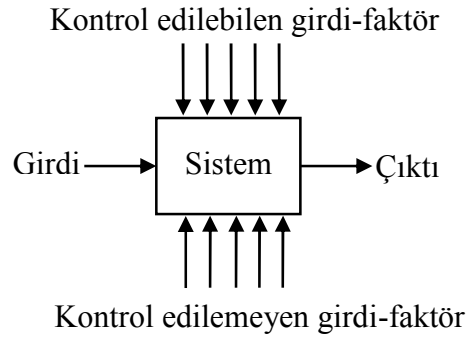
Şekil 5.26: Üçlü karışım faz diyagramları

(a) Oda sıcaklığı (24 °C), (b) 5 °C, (c) 0 °C, (ç) -5 °C, (d) -10 °C

5.2.4 Yanıt Yüzey Yöntemi ve Deney Tasarımı

Deneysel çalışmalar bilimsel araştırmaların ayrılmaz bir parçasıdır ancak uzun zaman ve dikkat gerektiren çalışmalardır. Deneysel çalışmalarda doğru bir sonuca ulaşabilmek için doğru deneylerin yapılması, parametrelerin doğru olarak belirlenmesi ve deney sonucundan neler istendiğinin doğru olarak bilinmesi gerekmektedir. Bütün bu koşullar yerine getirildiği zaman bile doğru bir sonuca ulaşmak için aynı numuneden veya aynı deneyden çok sayıda yapılması gerekebilmektedir. Bu durum zaman ve maliyet açısından olumsuzluklar yaratmaktadır. Yapılacak deneysel çalışmalarda deneyin bilimsel yöntemlerle tasarlanması deney sonuçlarının kararlılığı kadar hem zaman hem de maliyet açısından da deney performansını artırıcı etki göstermektedir.

Deney tasarımı, bir sistemdeki girdi değişkenleri üzerine etki eden kontrol edilebilir değişkenlerin değerlerini sistematik olarak değiştirerek süreç performansını etkileyecek değişken değerlerini belirlemede kullanılan bir teknik olarak tanımlanmaktadır [158-160]. Şekil 5.27’de bir sistemin genel yapısı görülmektedir.



Şekil 5.27: Bir sistemin genel yapısı

Bir deney için yapılacak tasarımda, araştırmanın genel amacının, incelenecek girdi değişkenlerinin ve düzeylerinin, deneyin çıktı değişkeninin, deneyin nasıl yapılacağına ifadesinin ve uygun analiz yöntemlerinin belirlenmesi gerekmektedir. Deney tasarımında tek faktörlü, çok faktörlü klasik yöntemler ve Shainin yöntemi, Taguchi yöntemi, yanıt yüzey yöntemi (Response Surface Metodology-RSM) gibi istatistiksel analiz yöntemleri kullanılmaktadır [158].

5.2.4.1 Yanıt Yüzey Yöntemi (RSM)

Çok sayıda parametrenin sonuç üzerine etkili olduğu sistemler için, parametrelerin birbiri üzerine etkilerini de ortaya koymak üzere geliştirilmiş olan istatistiksel yöntemler, deney tasarımı ve sonuçlarının yorumlanmasında da kullanılmaktadır. İstatistiksel temele dayanan kullanılabilir yöntemlerin başında RSM gelmektedir. Deney tasarımı bir işlem üzerinde istatistiksel kontrolün kurulmasında çok kullanışlıdır ve RSM en iyi çıktı değeri için deney tasarımını temel almaktadır [158]. Ayrıca, RSM az sayıda deneysel veri ile maksimum bilgiye ulaşılması, etkin parametreleri eş zamanlı olarak değiştirebilme ve optimizasyon yönünden diğer yöntemlere göre avantajlıdır.

RSM ilk olarak 1950'lerin başında kimya ve endüstri alanında dizayn edilen deneyler üzerinde çok yaygın olarak kullanılan bir optimizasyon tekniği olmuştur ve başarı ile kullanılmıştır. Son yirmi yıldır kimya endüstrisinin yanı sıra makine, elektronik ve imalat gibi önemli üretim süreçlerinde de yaygın olarak kullanılmaktadır. RSM kullanılarak yapılan bir deneysel çalışmadaki işlemler;

- Yapılacak deneyin tanımlanması,
- Deneye etki eden faktörlerin seçilmesi,
- Değişkenlerin tespiti,
- Deney tasarımının seçilmesi,
- Seçilen tasarımın işletilmesi ve matematiksel modelin kurulması,
- Matematiksel modelin doğruluğu/uygunluğunun tespiti,
- Verilerin istatistiksel analizi şeklinde sıralanmaktadır.

Deney tasarımının seçilmesinden sonraki aşamada olan seçilen tasarımın işletilmesi ve deneyden elde edilen çıktılara etki eden faktörler ile matematiksel kurulması aşamasında istatistiksel bir metod olan RSM çıktıların istenilen en ideal seviyede olmasını sağlamak amacıyla girdilerin optimizasyonuna izin vermektedir. RSM ile yapılacak deneyde, çıktılar ile bağımsız değişkenler arasındaki ilişki bilinmelidir. Bu nedenle RSM'deki ilk adım, çıktı değeri ile bağımsız değişkenler arasındaki doğru ilişki için uygun yaklaşımı bulmak olmaktadır. Bu nedenle bağımsız değişkenlerin lineer veya lineer olmayan fonksiyonu ile tüm çıktılar için

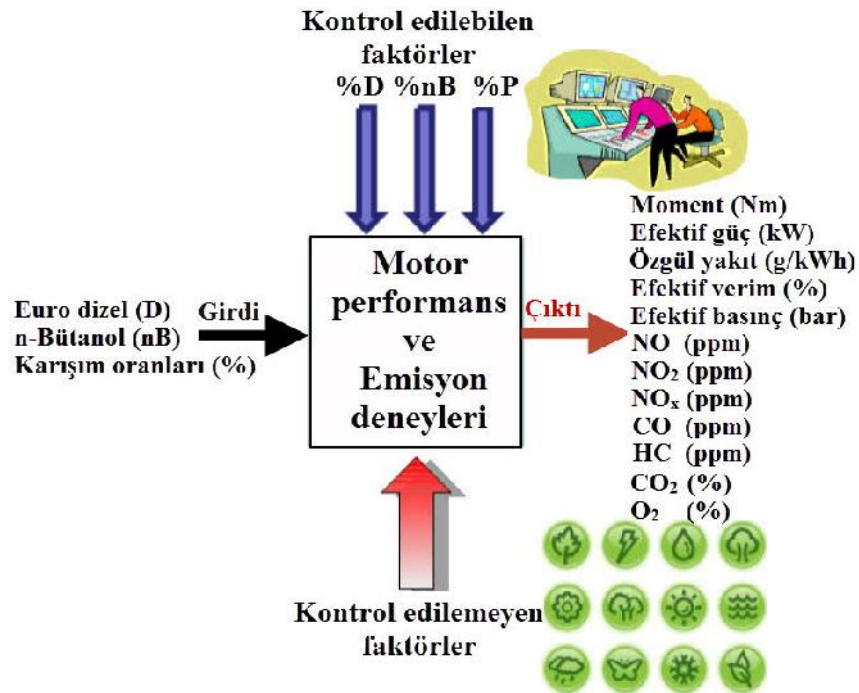
ayrı olmak üzere (5.1)'de gösterilen ikinci dereceden (full quadratik) bir matematiksel model kurulur.

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^n \beta_i X_i + \sum_{i=1}^n \beta_{ii} X_i^2 + \sum_{i<j}^n \beta_{ij} X_i X_j + e \quad (5.1)$$

Matematiksel modelde çıktı parametresi Y , girdi parametresi X , katsayılar β ve hata miktarı e ile gösterilmektedir. Girdiler ile kurulan matematiksel modelde çıktılar tarafından oluşturulan yanıt yüzeyinin değerleri ile gerçek deney sonuçlarının arasındaki fark yapılan analiz sonucunda ne kadar az ise matematiksel modelin doğruluğu ispatlanmış olmaktadır. Bu matematiksel ilişki kullanılarak denenmemiş girdi kombinasyonları için çıktıların değerleri ya da istenen çıktı değerlerine ulaşmak için girdilerin değerinin ne olması gerektiği kısmi türevler vasıtasıyla hesaplanabilmektedir.

5.2.4.2 Deney Tasarımı

Dizel motorunda kullanılacak alternatif biyoyakıt karışımının tasarlanması kapsamında yapılan çalışmada, deneylerin tasarlanması ve verilerin analizi aşamasında bir deney tasarım tekniği olan RSM kullanılmıştır. RSM için yapılan deney tasarımı Şekil 5.28'de gösterilmektedir.



Şekil 5.28: Deney tasarımı

RSM ile yapılan deney tasarımı, bileşenlerin soğuk akış özelliklerine göre çizilen üçlü faz diyagramında kararlı (çözünür) oldukları alanda yer alan konsantrasyonlardan motor performansı ve egzoz emisyonları bakımından optimum euro dizel, n-bütanol ve pamuk yağı üçlü karışım konsantrasyonunun belirlenmesi amaçlanmaktadır.

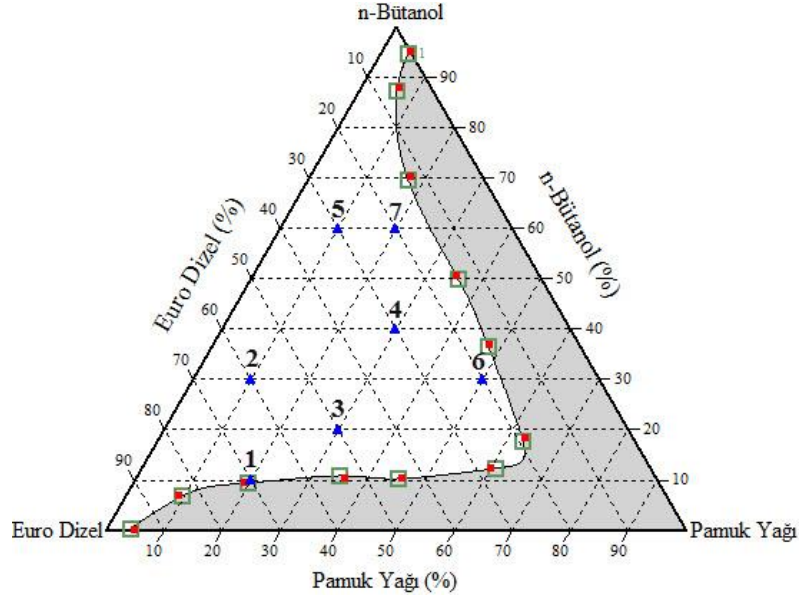
Buna göre deneysel çalışmanın kontrol edilebilen faktörleri olan euro dizel yakıtı, n-bütanol ve pamuk yağından oluşan üç bileşenin hacimsel karışım oranından seçilen iki bileşenin karışım oranı aynı zamanda girdi faktörü olarak kullanılmıştır. Bu girdilere göre yapılan motor performans ve emisyon deneyleri sonucunda elde edilen moment, efektif güç, özgül yakıt tüketimi, efektif verim, efektif basınç, NO, NO₂, NO_x, CO, HC, CO₂ ve O₂ parametreleri ise çıktı olarak alınmıştır.

5.2.5 Deney Tasarımında Kullanılan Üçlü Karışımlar

Euro dizel, n-bütanol ve pamuk yağı üçlü karışımlarının birbirleri ile olan çözünürlükleri ve soğuk akış özelliklerine göre sırasıyla oda sıcaklığı (24 °C) , 5 °C, 0 °C, -5 °C, ve -10 °C'deki çözünürlük ilişkisini belirleyen üçlü karışım faz diyagramları çizilmiştir. Bu diyagramlarda üç bileşenin sıcaklığa bağlı olarak faz kararlılığını sağladığı çözünür alanlar belirlenmiştir.

Euro dizel yakıtına göre daha yüksek bulutlanma ve akma noktasına sahip olan yakıt bileşenlerinden oluşan karışımlarda soğuk hava şartlarında çalıştırma sorunları oluşmaktadır [26, 88,91]. Üç bileşenden oluşan yakıt karışımında bileşenlerin birbiri ile olan çözünürlüğü sıcaklığa bağlı olarak değiştiğinden sıcaklık değiştiğinde faz diyagramında görülen işaretli noktaların yerleri de değişmektedir. Bu nedenle en düşük sıcaklık değeri olan -10 °C için çizilen faz diyagramındaki çözünür alandaki üçlü karışımlar diğer dört sıcaklık değeri içinde kararlı karışım olacaktır. Tasarlanan yakıtı oluşturan bileşenlerin soğuk akış özelliklerine göre soğukta ilk çalıştırma, depolama, taşıma, soğuk iklim şartlarında dayanıklılığını ve kararlılığını koruması bakımından en düşük sıcaklık değeri olan -10 °C için çizilen üçlü karışım faz diyagramındaki çözünür alan seçilmiştir. Deney tasarımı ile az sayıda deney sonucu ile analiz yapılması amaçlanmıştır. Bu nedenle çözünür alan içerisinde yer alan üçlü karışım noktalarından dizel motor performansı ve egzoz emisyonları bakımından

optimum euro dizel, n-bütanol ve pamuk yağı üçlü karışım konsantrasyonunun belirlenmesi için deney tasarımında kullanılacak konsantrasyonlar belirlenmiştir. Şekil 5.29’da deney tasarımında kullanılan üçlü karışım oranlarının noktaları, Tablo 5.8’de ise bu noktaların hacimsel karışım oranları görülmektedir.



Şekil 5.29: Deney tasarımında kullanılan üçlü karışım oranları

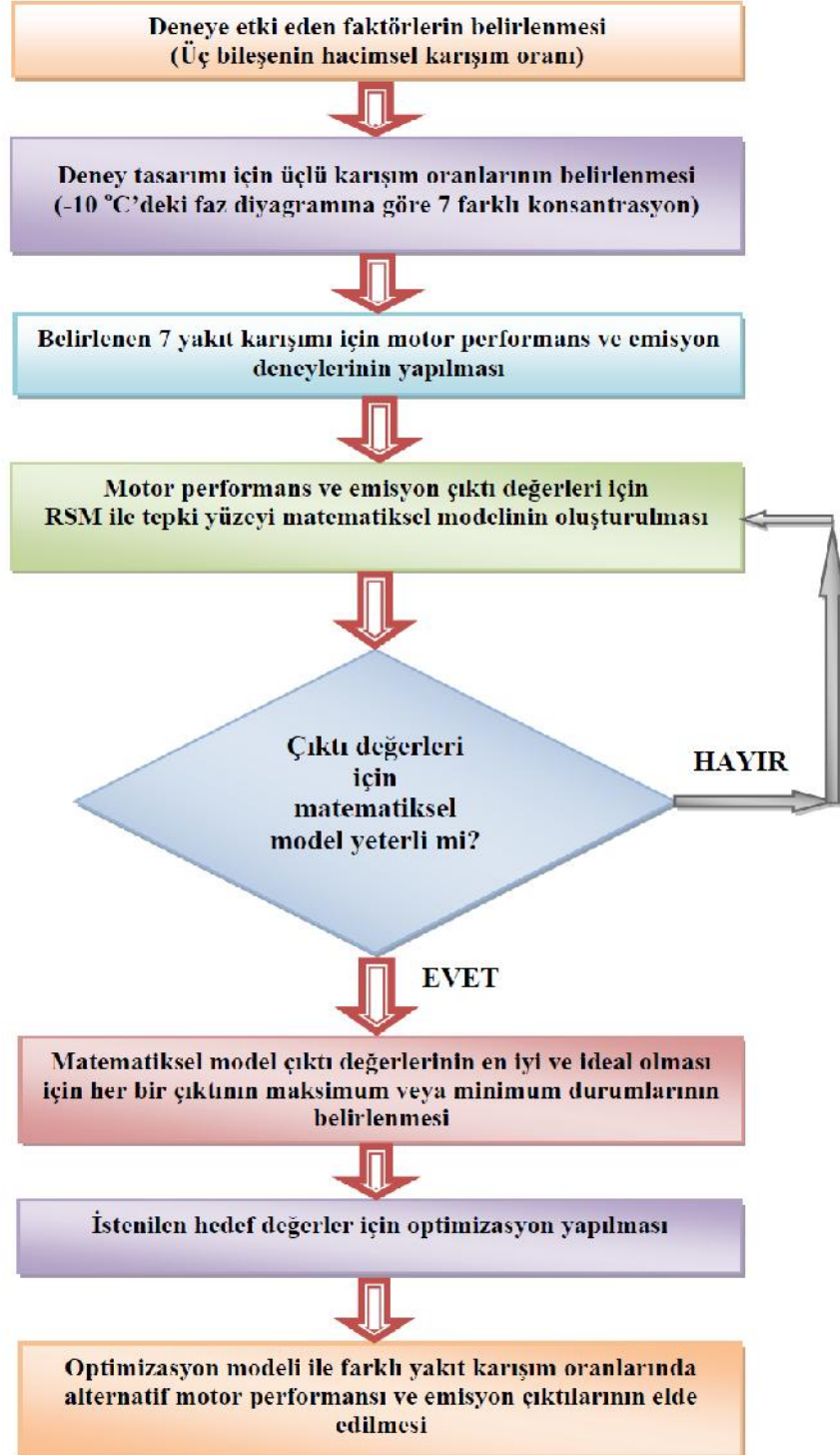
Bu noktaların seçilmesinde, üçlü karışımındaki biyoyakıt kullanım oranının artırılması için dizel yakıtı karışım oranına, düşük ısı değeri ve setan sayısı nedeniyle de n-bütanol karışım oranına dikkat edilmiştir. Buna göre üç bileşenin oluşturduğu çözünür alandan ortogonal (dik) dizi özelliğine yakın özellik gösterecek şekilde belirli noktalardan yüzeyin aralığını tamamlayacak ve güvenli çözüm uzayını temsil edecek uç köşe noktalar ve ana noktalar seçilmiştir.

Tablo 5.8: Üçlü karışımların hacimsel oranları

Deney Yakıtları			Karışım Numarası (▲)
Euro dizel (%)	n-Bütanol (%)	Pamuk yağı (%)	
70	10	20	1
60	30	10	2
50	20	30	3
30	40	30	4
30	60	10	5
20	30	50	6
20	60	20	7

5.2.6 Deneysel Çalışmada RSM İşlem Sırası

Seçilen karışımlar ile RSM kullanılarak yapılan deneysel ve istatistiksel çalışma kapsamında izlenen işlem sırası Şekil 5.30'da gösterilmektedir.



Şekil 5.30: RSM işlem sırası

5.2.7 Deney Yakıtlarının Hazırlanması

Deney yakıtlarının hazırlanması işlemi Balıkesir Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi laboratuvar imkânları kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Biyoyakıt karışımı hazırlamak için üç teknik kullanılmaktadır. Bunlar splash-blending, yakıt tankı içinde karıştırma ve yakıt hattı üzerinde karıştırma tekniği olarak sıralanmaktadır [151,161].

Karışım hazırlamada kullanılan bu teknikler arasında daha etkili, verimli ve yaygın bir şekilde kullanılan yöntem olarak splash blending karıştırma tekniği gösterilmektedir [40,59,99,151,161].

Bu karıştırma tekniğinde 1000 ml'lik ve 500 ml'lik mezürler kullanılarak her konsantrasyon için 5 litrelik karışım hazırlanmıştır. Yakıt kabına oda sıcaklığında Şekil 5.31'de görüldüğü gibi önce euro dizel yakıtı sonra sırasıyla nötr pamuk yağı ve n-bütanol ilave edilmiştir.



Şekil 5.31: Karışım hazırlama

Yakıt bileşenleri seçilen konsantrasyonda birbiri içinde rahatlıkla çözüldüğü için karışıma dışarıdan herhangi bir enerji (karıştırma işlemi) verilmemiştir ve karışımlardan alınan numunelerde herhangi bir faz ayrışması gerçekleşmemiştir.

5.2.7.1 Üçlü Karışımların Hesaplanan Yakıt Özellikleri

Hazırlanan üçlü yakıt karışımlarındaki yakıt bileşenlerinin bilinen yakıt özellikleri kullanılarak, Kay karışım kuralına göre sırasıyla yoğunluk, alt ısı değer ve setan sayıları, Arrhenius karışım kuralına göre de kinematik viskoziteleri hesaplanmıştır [81,95,162-164].

Yoğunlukların Hesaplanması

Karışımların yoğunluklarının hesaplanmasında Kay karışım kuralına göre (5.2)'de verilen eşitlikten yararlanılmıştır.

$$\rho_k = \sum_{i=1}^3 (x_i \rho_i) \quad (5.2)$$

Eşitliğe göre ρ_k karışımın g/ml cinsinden yoğunluğunu, i sırasıyla üç yakıt bileşenini, x_i yakıt bileşenlerinin hacimsel karışım oranlarını ve ρ_i ise bilinen yoğunluklarını ifade etmektedir.

Alt Isıl Değerlerin Hesaplanması

Karışımların alt ısı değerlerinin hesaplanmasında Kay karışım kuralına göre (5.3)'de verilen eşitlikten yararlanılmıştır.

$$Hu_k = \frac{\sum_{i=1}^3 (x_i \rho_i Hu_i)}{\sum_{i=1}^3 (x_i \rho_i)} \quad (5.3)$$

Eşitliğe göre Hu_k karışımın Mj/kg cinsinden alt ısı değerini ve Hu_i ise yakıt bileşenlerinin bilinen alt ısı değerlerini ifade etmektedir.

Setan Sayılarının Hesaplanması

Karışımların setan sayılarının hesaplanmasında Kay karışım kuralına göre (5.4)'de verilen eşitlikten yararlanılmıştır.

$$SS_k = \sum_{i=1}^3 (x_i SS_i) \quad (5.4)$$

Eşitliğe göre SS_k karışımın setan sayısını ve SS_i ise yakıt bileşenlerinin bilinen setan sayılarını ifade etmektedir.

Kinematik Viskozitelerin Hesaplanması

Karışımların kinematik viskozitelerinin hesaplanmasında Arrhenius karışım kuralına göre (5.5)'de verilen eşitlikten yararlanılmıştır.

$$\ln \eta_k = \sum_{i=1}^3 x_i \ln \eta_i \quad (5.5)$$

Eşitliğe göre η_k karışımın kinematik viskozitesini ve η_i ise yakıt bileşenlerinin bilinen kinematik viskozitelerini ifade etmektedir.

Hesaplanan Yakıt Özellikleri

Euro dizel yakıtı, n-bütanol ve nötr pamuk yağının yoğunlukları piknometre ile ölçülerek bulunmuştur. Euro dizel yakıtının alt ısı değeri ve setan sayısı Petrol Ofisi firmasından, n-bütanolün değerleri Tekkim firmasından temin edilmiştir. Nötr pamuk yağının bilinen yakıt özellikleri ise literatürdeki verilerden alınmıştır [16,21,28,33]. Bilinen ve hesaplanan yakıt özellikleri Tablo 5.9'da görülmektedir.

Tablo 5.9: Bilinen ve hesaplanan yakıt özellikleri

Yakıtlar	Karışım oranı (%)			Yoğunluk 25 °C (g/ml)	Alt ısı değer (MJ/kg)	Setan sayısı	Kinematik viskozite, 40 °C (mm ² /s),	
	D	nB	P					
Bilinen	Euro dizel	100	-	-	0,820	43,38	55,5	2,21
	n-Bütanol	-	100	-	0,810	33,10	17	2,23
	Pamuk yağı	-	-	100	0,920	38,33	41,8	32,75
Hesaplanan	1	70	10	20	0,839	41,28	48,91	3,79
	2	60	30	10	0,827	39,80	42,58	2,90
	3	50	20	30	0,848	39,77	43,69	4,97
	4	30	40	30	0,846	37,79	35,99	4,98
	5	30	60	10	0,824	36,75	31,03	2,90
	6	20	30	50	0,867	37,81	37,10	8,53
	7	20	60	20	0,834	36,27	29,66	3,81

5.2.8 Motor Performansı ve Egzoz Emisyon Deneyi Aşamaları

Motor performansı deneyinde kullanılan Land Rover marka dizel motora, yenileştirme işlemi uygulanmıştır. Motor performans deneylerine başlamadan önce yakıt enjeksiyon pompası referans değerlerine göre ayarlanmıştır. Ayrıca, enjektör püskürtme basınçları (200 bar), enjektör nominal püskürtme avansı (15° KMA) ve supap ayarı (emme ve egzoz 0,20 mm) katalogda belirtilen değerlere uygun olarak ayarlanmıştır.

Sabitlenme aparatı kullanılarak, egzoz emisyon test cihazının probu motorun egzoz manifoldundan 180 cm ileriye egzoz gazı sıcaklık sensörünün öncesinde monte edilmiştir. Motor performansı deneyleri TS 1231 standardına göre, egzoz emisyon deneyleri ise TS 11365 standardına göre yapılmıştır [165,166]. Euro dizel yakıtı ile TS 1231’de belirtildiği gibi motor, maksimum gücünün %10’u olan 8,2 kW güç ve rölanti devrinin 2 katı olan 1440 d/dk.’da çalışma sıcaklığına getirilene kadar çalıştırılmıştır. Çalışma sıcaklığına gelen motor üzerinden yük kaldırılarak tekrar rölanti devri olan 720 d/dk.’ya getirilerek 5 dk. çalıştırılmıştır.

Motor yükü gaz kolunun konumudur ve dizel motorlarında gaz kolunun konumu motor yükünü belirlemektedir. Motor belirlenen konumda sabit bir dönme sayısında ve yük direncini yenecek şekilde çalışır. Gaz kolunun tam itili konumu motorun tam yükte çalışmasına karşılık gelmektedir. Bu kapsamda, motor performans ve egzoz emisyon değerlerinin ölçülmesi için maksimum moment (2200 d/dk.) ve maksimum güç (3800 d/dk.) devirlerini de içine alacak şekilde tam yük değişik devir testi prosedürüne göre motor performans ve emisyon deneyleri yapılmıştır.

Motor tam gaz konumuna getirilerek, motorun maksimum devri olan 4400 d/dk.’da motor performans ve egzoz emisyon değerleri ölçülmüştür. Motor tam gaz konumunda iken gaz koluna dokunmadan test cihazı ile yüklenmeye başlanmış, sırasıyla 4200, 3800, 3400, 3000, 2600, 2200 ve 1800 d/dk.’da motor performans ve egzoz emisyon değerleri tekrar ölçülmüştür. İlk deney euro dizel yakıtıyla yapılmıştır ve motor rölanti devrinde ara dinlenmeye bırakıldıktan sonra elektrikli yakıt pompası yardımıyla yakıt sistemindeki bütün dizel yakıtı boşaltılarak test yakıtların

birbirlerine karışması engellenmiştir. Daha sonra, yakıtın tamamen boşaltılmasıyla yakıt sisteminde oluşan hava alınmıştır. Sonraki aşamada, sırasıyla Şekil 5.32’de görülen üçlü karışım yakıtlarıyla yapılan deneylere geçilmiştir. Deney süresince motor soğutma suyu çıkış sıcaklığı 80-85 °C aralığında tutulmuştur.



Şekil 5.32: Deney yakıtları

Deneyler esnasında motor devir sayısı, seçilen devir sayısından % ± 5 veya 10 d/dk.’dan hangisi büyükse ondan daha fazla sapmayacak şekilde kararlı hale geldikten sonra motor gücü, momenti ve yakıt tüketimi değerleri tespit edilmiştir.

Egzoz emisyonları ölçümünde ise motor devri kararlı hale geldikten sonra emisyon değerlerinin de kararlı hale gelmesi beklenmiş ve daha sonra emisyon değerleri kaydedilmiştir. Bütün test yakıtlarıyla yapılan deneyler üç kez tekrarlanmış ve ölçülen değerlerin aritmetik ortalaması hesaplanmıştır.

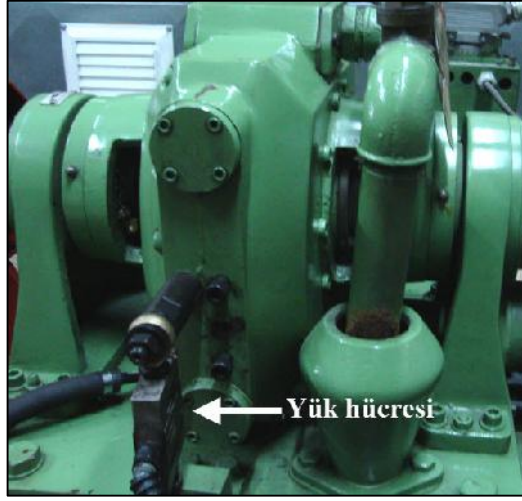
5.2.9 Motor Performans Hesaplamaları

Motor test cihazı yardımıyla ölçülen değerler kullanılarak efektif güç, özgül yakıt tüketimi, efektif verim ve ortalama efektif basınç değerleri aşağıda açıklanan formüller kullanılarak hesaplanmıştır.

5.2.9.1 Moment ve Efektif Güç

Motor test cihazındaki efektif güç, kullanıcı tarafından herhangi bir hesaplama gerektirmeden sistem programı tarafından hesaplanmakta ve ekrana

yansıtılmaktadır. Motor gücünün tespitinde kullanılan terazi ve yük hücresi Şekil 5.33'te görülmektedir.



Şekil 5.33: Terazi ve yük hücresinin genel görünümü

Motor test cihazı ile ölçülen motor momentine bağlı olarak efektif güç (P_e) (5.6) eşitliği kullanılarak hesaplanmıştır [138].

$$P_e = \frac{M_d \cdot n}{9549} \quad (5.6)$$

P_e = Efektif güç (kW), M_d = döndürme momenti (Nm), n = motor devri (d/dk.)

Mil yatakları ve mil burçlarındaki sürtünmeler, önceden hesaba katıldığından ölçümü etkilemezler. Test odasının basıncı, sıcaklığı, bağıl nemi ve test motorunun tipi göz önüne alınarak, düzeltme faktörü (K_d) sistem programı tarafından hesaplanmakta ve elde edilen değer ham güç ile çarpılarak ekrana düzeltilmiş güç olarak yansıtılmaktadır. Bu düzeltmelerle ilgili TS 1231 standartlar esas alınmıştır.

Bu standartlara göre, deney atmosferik şartları dizel motorlar için atmosferik sıcaklık değeri $283 \text{ K} (10 \text{ °C}) < T < 313 \text{ K} (40 \text{ °C})$ değerleri arasında ve basınç değerleri $80 \text{ kPa} < P < 110 \text{ kPa}$ sınırları arasında olmalıdır. Dizel motorlarda sabit yakıt sevki durumunda güç düzeltme faktörü (K_d) ise $0,9 < K_d < 1,1$ değerleri arasında olmalıdır.

5.2.9.2 Özgül Yakıt Tüketimi

Her birim güç çıkışı için saatte tüketilen yakıt miktarı olarak tanımlanan özgül yakıt tüketimi değerlerinin hesaplanmasında (5.7)'deki eşitlikten yararlanılmıştır. Bu değer motorun güç üretmek için yakıtı ne kadar verimli kullandığının bir ölçüsü olarak tanımlanmaktadır [138].

$$b_e = \frac{B_e}{P_e} \quad (5.7)$$

b_e = Özgül yakıt tüketimi (g/kWh)

B_e = saatlik yakıt tüketimi (g/h)

5.2.9.3 Efektif Verim

Motor çıkış milinden alınan enerjinin, verilen toplam yakıt enerjisine oranı olarak tanımlanan efektif verimin hesaplanmasında (5.8)'deki eşitlikten yararlanılmıştır. Bu değer yakıt dönüşüm verimi olarak tanımlanmaktadır [138].

$$\eta_e = \frac{3,6 \cdot 10^6}{b_e \cdot H_u} \quad (5.8)$$

H_u = Alt ısı değer (kJ/kg)

5.2.9.4 Ortalama Efektif Basınç

Ortalama efektif basınç, efektif gücü verecek şekilde piston üst yüzeyine strok boyunca etkiyen basınç olarak tanımlanmaktadır. Ortalama efektif basınç değerlerinin hesaplanmasında, (5.9)'daki eşitlikten yararlanılmıştır [138].

$$P_{me} = \frac{120 \cdot P_e}{V_H \cdot n} \quad (5.9)$$

P_{me} = Ortalama efektif basınç (kPa)

P_e = Efektif güç (kW)

V_H = Toplam kurs hacmi (m³)

n = Motor devri (d/dk.)

5.2.10 Deney Sonuçları ile RSM Uygulaması

RSM ile yapılan deney tasarımı seçilen 7 farklı karışımın motor performans ve emisyon deneyleri yapılmıştır. Birçok istatistiksel yazılım programı temel RSM özelliklerinden olan deney tasarımı ve optimizasyon tekniklerini içermektedir. Deneysel verileri analiz etmek için kullanılan bu istatistiksel programlardan bir tanesi de Minitab yazılımıdır. Deney sonuçlarına göre Minitab16 programındaki RSM işlem sırası uygulanmıştır.

RSM’de ilk olarak çıktıyı etkileyen faktörlerin ve bu faktörlerin düzeylerini belirlemek gerekmektedir. RSM’de model, regresyon analizi yardımıyla oluşturulur. Bir girdi faktörünün çıktı değişkeninin değerlerinde ne derece önemli bir etkiye sahip olduğuna regresyon katsayıları yardımıyla karar verilir. Çıktı ve girdi faktörü arasındaki fonksiyonun matematiksel formu birden fazla değişken olduğunda ikinci dereceden bir polinomial ile belirlenmektedir. Matematiksel modelinin oluşturulması toplanmış verilerle (5.1) eşitliğindeki β katsayılarının tahmin edilmesiyle gerçekleştirilir.

Tam yük değişik devir test prosedürünün uygulandığı motor performans ve emisyon testlerinde 4400-1800 devirleri arasında 8 devir aralığı seçilmiştir. Optimum karışım oranının tespiti için yapılan RSM çalışmasına bütün devir aralıklarının katılmasında deney girdi faktörü olarak belirlenen üçlü karışımın euro dizel yakıtı ve n-bütanol karışım oranlarının yanında üçüncü bir değişken faktör olan motor devri ile çıktılar arasında %95 güven olasılığı ile kurulan matematiksel modelde R^2 doğruluk değeri bakımından anlamlı sonuçlar elde edilememiştir. Çünkü R^2 değeri ne kadar yüksek ise modelin anlamlılık düzeyi de o kadar yüksek olmaktadır [158-160].

Dizel motorları en düşük yakıt tüketimini belli bir dönme sayısında sağlarlar. Bir dizel motorun saatlik yakıt tüketimi eğrisi incelendiğinde motor devrinin artmasıyla, dakikadaki dönme sayısının artmasına bağlı olarak, çevrim sayısı da artmakta ve saatlik yakıt tüketimi yükselmektedir. Buna göre harcanan yakıt miktarına bağlı olarak elde edilen motor gücü göz önüne alındığında motorun birim kW güç çıkışı için yakıtın en verimli yandığı ve yakıt tüketiminin en az olduğu devir maksimum momente karşılık gelen devirdir.

Test motorunun özelliğine göre, en düşük yakıt tüketiminin olduğu ekonomik dönme sayısı maksimum moment devri olan 2200 d/dk.'dır. Bu devir motorun en kararlı çalıştığı devirdir. Literatürde yapılan çalışmalarda da ekonomik devir aralığı olarak maksimum moment devri gösterilmektedir [24,33,63,74,82,104]. Bu maksatla RSM çalışmasında deney motorunun 2200 d/dk.'daki motor performansı ve egzoz emisyon değerleri esas alınmıştır.

5.2.10.1 Matematiksel Modelin Kurulması

Tez çalışması için yapılan deney tasarımında deneye etki eden faktörler bileşenlerin karışım oranlarıdır. Bu üçlü karışımları oluşturan hacimsel oranlardan dizel yakıtı (D (%)) ve n-bütanol (nB (%)) karışım oranları alınmıştır. Üçüncü bileşen olan pamuk yağının karışım oranı ise diğer iki bileşenin toplamından geriye kalan kısımdır. Bu iki girdi faktörünün etkisi ile yapılan deneyler sonucunda elde edilen ve Tablo 5.10'da görülen 12 farklı değer çıktı olarak tanımlanmıştır.

Tablo 5.10: 2200 d/dk.'daki deney çıktıları

Yakıt	Girdi faktörleri		Çıktılar											
	D (%)	nB (%)	Moment (Nm)	Efektif güç (kW)	Özgül yakıt tüketimi (g/kWh)	Efektif verim (%)	Ortalama efektif basınç (bar)	NO (ppm)	NO ₂ (ppm)	NO _x (ppm)	CO (ppm)	HC (ppm)	CO ₂ (%)	O ₂ (%)
1	70	10	232,4	56,30	247,00	35,31	12,32	759,00	33,35	792,36	553,00	109,00	10,54	6,58
2	60	30	212,5	52,50	254,00	35,61	11,49	1096,00	24,10	1120,10	271,00	39,00	9,20	8,42
3	50	20	220	54,40	332,92	27,19	11,91	1230,00	34,40	1264,40	676,00	150,00	9,35	8,18
4	30	40	209,2	51,80	318,62	29,89	11,34	1190,00	33,90	1223,90	382,00	131,00	8,99	8,7
5	30	60	181,8	45,20	425,51	23,02	9,89	878,00	26,40	904,40	133,00	10,00	8,35	9,6
6	20	30	215,5	52,90	373,55	25,48	11,58	1210,00	35,50	1245,50	831,00	176,00	9,49	7,99
7	20	60	193,1	47,60	401,89	24,69	10,42	1040,00	29,40	1069,40	179,00	11,00	8,66	9,18

Minitab 16 programındaki RSM'de maksimum moment devrinde elde edilen deney sonuçları ile kullanılmıştır. Her bir çıktı değerinin (y), girdiler ile ilişkisini gösteren yüzeyin belirlenmesi için RSM ile (5.1) eşitliği esas alınarak (5.10) eşitliğine göre ikinci dereceden (full quadratik) matematiksel modelleri kurulmuştur.

$$y = \beta_0 + \beta_1.D + \beta_2.nB + \beta_3.D^2 + \beta_4.nB^2 + \beta_5.D.nB \quad (5.10)$$

Her bir çıktı için ayrı sabit değer β_0 , dizel karışım oranının katsayısı β_1 ve alkol karışım oranının katsayısı β_2 ile ifade edilmektedir.

RSM’de %95 güven olasılığı ile her bir çıktı için kurulan ikinci dereceden matematiksel modelin katsayıları Tablo 5.11’de görülmektedir.

Tablo 5.11: Matematiksel modelin katsayıları

Katsayı	Değişken hacimsel karışım oranı (%)	Moment	Efektif güç	Özgül yakıt tüketimi	Efektif verim	Ortalama efektif basınç	NO	NO ₂	NO _x	CO	HC	CO ₂	O ₂
		(Nm)	(kW)	(g/kWh)	(%)	(bar)	(ppm)	(ppm)	(ppm)	(ppm)	(ppm)	(%)	(%)
β_0 -Sabit	(%)	168,26504	39,43814	947,55132	-15,57162	8,63231	-167,93871	21,24767	-146,69103	2951,58343	237,45062	11,02212	5,77303
β_1	D	0,97200	0,32582	-6,41019	0,20174	0,07132	36,44412	0,90794	37,35206	-31,50143	4,69520	-0,05958	0,08186
β_2	nB	2,45493	0,62317	-25,89512	1,99959	0,13640	50,96712	0,37680	51,34392	-73,67827	-2,61925	-0,01210	0,02160
β_3	D ²	-0,00033	-0,00116	-0,03022	0,00556	-0,00025	-0,36154	-0,00919	-0,37072	0,03554	-0,08258	0,00083	-0,00112
β_4	nB ²	-0,02807	-0,00712	0,25312	-0,01941	-0,00156	-0,57082	-0,00283	-0,57365	0,46301	-0,01765	-0,00005	0,00004
β_5	D x nB	-0,03411	-0,00814	0,19164	-0,01281	-0,00178	-0,37525	-0,01491	-0,39016	0,47965	-0,04542	-0,00044	0,00057

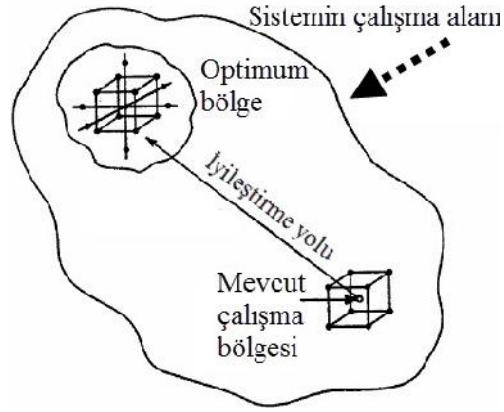
Regresyon analizi ile elde edilen R² doğrulama değerleri, kurulan matematiksel modelin doğruluğunu göstermektedir. Gerçek deney çıktıları ile RSM çıktıları arasındaki hata miktarı ile değişkenlerin birbirini ne kadar etkilediğinin ve karşılığının bir göstergesi olan R² değerleri ile RSM çıktı değerleri Tablo 5.12’de görülmektedir. Çıktı parametrelerinden biri olan güç için R² değeri %99,94 olarak bulunmuştur. Kontrol edilebilen girdi parametresi olan karışım oranları, çıktı parametresi olan gücün oluşmasında %99,94 etki göstermektedir ve geriye kalan %0,06’lık kısım ise kontrol edilemeyen faktörleri temsil etmektedir. Diğer çıktı parametreleri için analiz edilen R² değerleri de güven aralığı içerisinde yer aldığı için matematiksel modelin doğruluğu kabul edilmiştir.

Tablo 5.12: RSM çıktıları ve R² değerleri

Yakıt	Girdi faktörleri		RSM çıktıları											
	D (%)	nB (%)	Moment (Nm)	Efektif güç (kW)	Özgül yakıt tüketimi (g/kWh)	Efektif verim (%)	Ortalama efektif basınç (bar)	NO (ppm)	NO ₂ (ppm)	NO _x (ppm)	CO (ppm)	HC (ppm)	CO ₂ (%)	O ₂ (%)
1	70	10	232,54	56,37	251,29	34,88	12,34	801,54	32,84	834,38	565,90	101,73	10,49	6,64
2	60	30	212,37	52,44	250,07	36,01	11,48	1057,01	24,57	1081,58	259,18	45,66	9,24	8,36
3	50	20	219,79	54,30	326,49	27,83	11,88	1166,19	35,17	1201,37	656,65	160,90	9,42	8,09
4	30	40	209,48	51,94	327,20	29,04	11,37	1275,08	32,87	1307,95	407,80	116,47	8,90	8,83
5	30	60	181,96	45,28	430,51	22,52	9,91	927,63	25,80	953,43	148,05	1,52	8,30	9,67
6	20	30	215,49	52,89	373,20	25,52	11,58	1206,46	35,54	1242,00	829,93	176,61	9,49	7,98
7	20	60	192,87	47,49	394,74	25,41	10,39	969,10	30,26	999,36	157,50	23,11	8,74	9,07
R² (%)			99,99	99,94	99,22	98,54	99,94	88,57	97,23	89,02	99,51	97,72	99,08	99,14

5.2.10.2 RSM ile Optimizasyon

Optimizasyon süreçlerinde Şekil 5.34'te görüldüğü gibi sistemin çalışma alanı içerisinde en ideal çıktı parametrelerinin elde edilebilmesi için girdi parametrelerinin çalışma alanının bulunması yer almaktadır. Böylece deney sayısı etkili bir şekilde azaltılarak istenilen sonuca ulaşılabilmektedir.



Şekil 5.34: Optimizasyon süreci

RSM modelleme ve analiz uygulamalarında birkaç değişkenden etkilenen çıktıların arzu edilen seviyede olması için girdilerin optimize edildiği, matematiksel ve istatistiksel teknikleri bir arada toplayan bir etkili bir yaklaşımdır. Matematiksel modelin doğruluğu sağlandıktan sonra yapılan RSM çalışmasının son adımı ise arzu edilen çıktı değerlerini sağlayacak girdilerin en ideal değerlerinin bulunmasını sağlandığı optimizasyon adımıdır.

$$RSM = \text{Deney Tasarımı} + \text{Matematiksel Model} + \text{İstatistiksel Analiz} \rightarrow \text{Optimizasyon}$$

Optimizasyon parametresi olarak dizel motor performansı için belirleyici olan moment, efektif güç, özgül yakıt tüketimi, efektif verim, ortalama efektif basınç parametreleri ile dizel motorlardan kaynaklanan kontrol edilmesi gereken egzoz emisyonlarından NO_x , CO ve HC parametreleri esas alınmıştır. Referans yakıt olarak euro dizel yakıtının ve 7 karışımın deney sonuçlarının maksimum ile minimum değerlerine göre optimizasyon parametrelerinin arzu edilen değerleri belirlenmiştir.

Minitab 16 programında RSM optimizer adımından çıktıların girdilerle oluşturduğu yüzeyin matematiksel modelinin ortak çözümü aracılığıyla istenilen çözüm aralıklarını bulmak maksadıyla, arzu edilen çıktı değerlerinin her birinin Tablo 5.13'te gösterilen maksimum, minimum ve hedef değerleri belirlenmiş ve bu değerleri sağlayacak girdi olarak belirtilen optimum üçlü karışımın hacimsel karışım oranının tespiti için optimizasyon yapılmıştır.

Tablo 5.13: Optimizasyon parametre değerleri

Parametre	Birim	R ² (%)	Ulaşılması istenen	En düşük değer	Hedef değer	En yüksek değer
Moment	Nm	99,99	Maksimum	210	234	--
Efektif güç	kW	99,94	Maksimum	50	57	--
Özgül yakıt tüketimi	g/kWh	99,22	Minimum	--	195	375
Efektif verim	%	98,54	Maksimum	28	42	--
Ortalama efektif basınç	bar	99,94	Maksimum	10	12	--
NO _x	ppm	89,02	Hedef değer	900	1000	1100
CO	ppm	99,51	Minimum	--	200	550
HC	ppm	97,72	Minimum	--	50	150

5.2.10.3 Optimize Karışımın Doğrulama Deneyi

Optimize karışımın Tablo 5.14'te görülen Minitab 16'daki RSM optimizasyonu çıktı değerleri ile gerçek deney sonuçlarını karşılaştırmak için deney yakıtı hazırlanarak doğrulama deneyi yapılmıştır.

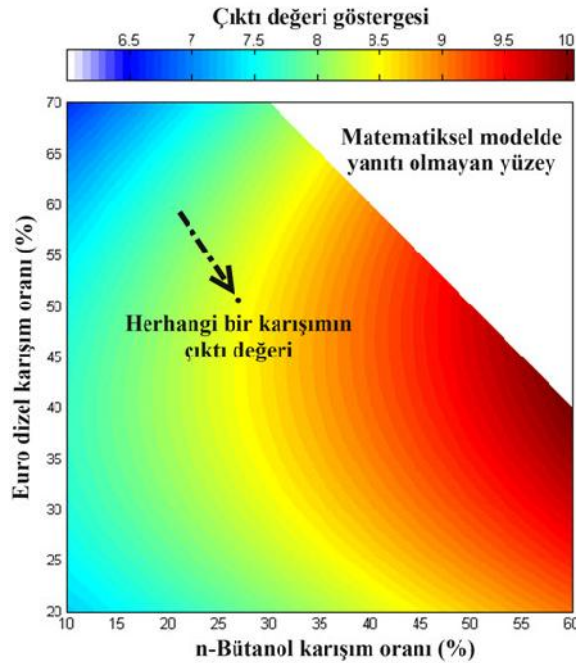
Tablo 5.14: Optimize karışımın çıktı değerleri

Optimizasyon parametresi	Optimizasyon çıktı değeri
Moment	220,62 Nm
Efektif güç	54,07 kW
Özgül yakıt tüketimi	224,90 g/kWh
Efektif verim	%37,94
Ortalama efektif basınç	11,83 bar
NO _x	998,9 ppm
CO	311,5 ppm
HC	52 ppm

5.2.11 Yüzey Grafiklerinin Çizilmesi

RSM ve optimizasyon dâhil her bir çıktı için kurulan matematiksel model kullanılarak üçlü karışımların çıktı parametreleri için Şekil 5.35'teki gibi yüzey grafikleri (contour plot) çizilmiştir. Bu grafikler üç boyutlu görünümün x-y eksenine taşınmış üst görünümünü temsil etmektedir. Grafikteki renkler çıktı parametresinin değer aralıklarını ifade etmektedir. Grafiğin içindeki herhangi bir nokta üçlü karışım konsantrasyonunu ve grafiği temsil eden çıktı parametresinin değerini göstermektedir.

MATLAB R2010b sürümündeki komut satırı kullanılarak her bir çıktının matematiksel modeli ile çizdirilen yüzey grafiklerinde x ekseninde hacimsel n-bütanol karışım oranı, y ekseninde hacimsel euro dizel yakıtı karışım oranı deney tasarımında yer alan oranlarda yer almaktadır. İki eksendeki değerlerin toplamı %100'ü geçmemesi gerekmektedir yani üçüncü bileşen olan nötr pamuk yağı karışım oranı da çizilen yüzey aralığında tanımlanmaktadır. Bu kapsamda kurulan matematiksel modelde x ve y değerlerinin toplamının 100'ü geçmesi durumunda yüzey yanıt (çıkıtı değeri) göstermemektedir. Bu nedenle o yüzey matematiksel modelde yanıtı olmayan yüzey olarak adlandırılmış ve beyaz renkle gösterilmiştir.



Şekil 5.35: Çıktıların yüzey grafiği

6. BULGULAR

6.1 Deney Yakıtlarının Yoğunlukları

Yakıt bileşenlerinin birbirleriyle olan çözünürlük ilişkisinin belirlenmesi için yapılan titrasyon işleminde ve yakıt karışımlarının alt ısıl değerlerinin hesaplanmasında ASTM D941, D1217 ve DIN 51 757 standartları referans alınarak ölçülen ve Tablo 6.1’de gösterilen yoğunlukları kullanılmıştır.

Tablo 6.1: Bileşenlerin yoğunlukları

Yakıt	Yoğunluk (g/ml)
Euro dizel	0,820
n-Bütanol	0,810
Nötr pamuk yağı	0,920

Bileşenlerin 25 °C’de ölçülen yoğunluklarının literatürde yer alan değerlere yakın olduğu tespit edilmiştir.

6.2 Nötr Pamuk Yağı Yağ Asit Kompozisyonu

Nötr pamuk yağının, TS EN 15779 standardına uygun olarak yapılan test sonucunda elde edilen % yağ asit kompozisyon değerleri Tablo 6.2’de verilmiştir.

Tablo 6.2: Nötr pamuk yağının yağ asit kompozisyon değerleri

Ölçülebilen yağ asitleri		Yağ asit kompozisyonu (%)
Doymuş	Laurik (C12:0)	0,10
	Miristik (C14:0)	0,79
	Palmitik (C16:0)	23,13
	Stearik (C18:0)	2,28
	Araşidik (C20:0)	0,29
	Behenik (C22:0)	0,51
	Lignoserik (C24:0)	0,13
Doymamış	Palmitoleik (C16:1)	0,20
	Oleik (C18:1)	19,08
	Linoleik (C18:2)	52,50
	Linolenik (C18:3)	0,22

Doğal yağ asitleri bir motordaki yanma karakteristiklerini belirlemektedir. Yanma kalitesi doymamışlık oranı ile azalmaktadır. Doymuş yağlar kalite noktasında doymamış yağlara göre kısa buharlaşma süresi, kısa tutuşma gecikmesi, çok az birikim oluşturma göstermektedirler. Ancak artan doymamışlık derecesine bağlı olarak düşen setan sayısına rağmen tek çift bağlı olan oleik yağ asitlerini içeren yağlar uygun dizel yakıtı alternatifi olarak görülmektedir [23,106,115]. Nötr pamuk yağının yağ asitlerinin yaklaşık %73'ü linoleik ve oleik başta olmak üzere tekli doymamış yağ asitlerinden oluşmaktadır. En önemli doymuş yağ asidi ise %23,13 ile oranındaki palmitik asittir. Nötr pamuk yağının yağ asit kompozisyonuna göre, yakıt özellikleri iyileştirilerek dizel motorlarda kullanılabilmesi değerlendirilmiştir.

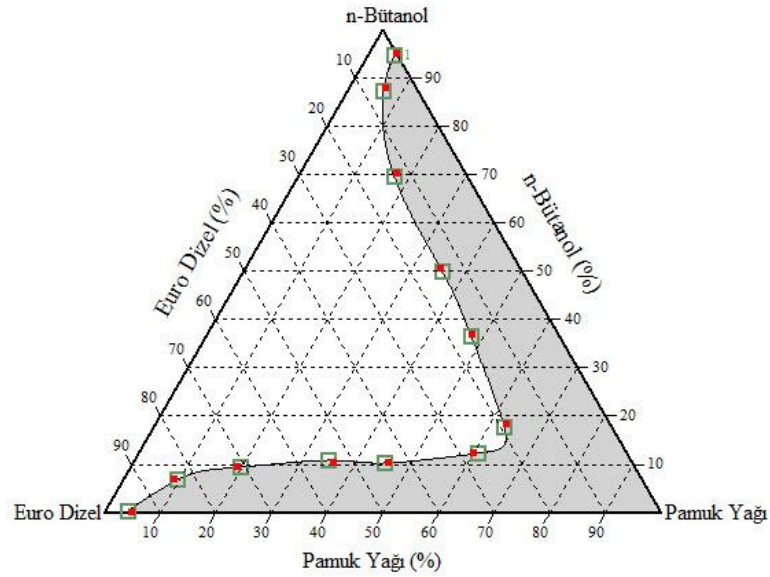
6.3 Mikroemülsiyon ile Faz Diyagramları

Yakıt bileşenlerinden oluşturulan üçlü karışım ve karışımlarının hangi şartlarda nasıl karışabileceği ve hangi şartlarda kararlı bir halde kalabileceği, sıcaklığa bağlı olarak birbiri içinde çözünme özelliklerinin bilinmesi ve test edilmesi ile mümkün olmaktadır. Bir yakıtın dizel motorlarda yakıt olarak kullanılabilmesi için düşük sıcaklıklarda berrak ve kararlı bir faz davranışı sergilemesi gerekmektedir [58]. Euro dizel ile pamuk yağı karışımlarının kararlılığını sağlamak için ortak çözücü olarak n-bütanol kullanılmıştır. Bu maksatla mikroemülsiyon sistemi olarak tasarlanan, euro dizel, n-bütanol ve pamuk yağı üçlü sisteminde sabit basınçta, oda sıcaklığı (24 °C), 5 °C, 0 °C, -5 °C ve -10 °C sıcaklıklardaki en dayanıklı ve kararlı mikroemülsiyonu verdiği konsantrasyonlar titrasyon ile belirlenmiş ve üçlü karışım faz diyagramları çizilmiştir.

6.3.1 Sıcaklığın ve Karışım Oranının Çözünürlüğe Etkisi

Euro dizel yakıtı ile pamuk yağı belirli bir noktaya kadar birbirleriyle karışmaktadır. Bunun için ikisinin karışımı iki fazlı sistemleri oluşturmaktadır. İki fazlı euro dizel yakıtı ile pamuk yağı sisteminin ağır olan fazı, euro dizele doymuş olan pamuk yağı, hafif olan fazı ise pamuk yağı ile doymuş olan euro dizel yakıtıdır. n-Bütanol ise, hem euro dizel hem de pamuk yağı ile tamamen karışmaktadır ve soğuk akış özellikleri bakımından diğer iki bileşene göre daha güçlü durumdadır. Bu nedenle düşük sıcaklıklarda da üçlü karışımda ortak çözücü görevini üstlenmektedir.

Sıcaklığa bağlı olarak euro dizel yakıtı ile pamuk yağı iki fazlı sistemine yeterli miktarda n-bütanol ilavesinin her üç bileşeninde karıştığı tek bir sıvı fazı oluşturmaktadır. Üç bileşenden oluşan yakıt karışımında bileşenlerin birbiri ile olan çözünürlüğünün sıcaklığa bağlı olarak değiştiği sıcaklık değiştiğinde faz diyagramında görülen işaretli noktaların yerlerinin de değiştiği tespit edilmiştir. Bu nedenle en düşük sıcaklık değeri olan Şekil 6.1'deki -10 °C için çizilen faz diyagramının ikili bileşen eksenleri ve üçgenin içi dikkate alınarak incelenmiştir.



Şekil 6.1: -10 °C için çizilen üçlü karışım faz diyagramı

Euro Dizel ile Pamuk Yağı Eksenleri

Euro dizel yakıtı ile pamuk yağı karışımlarında pamuk yağı karışım yüzdesinin artmasına paralel olarak pamuk yağına doymuş euro dizel bölgesinde sıcaklık düştükçe çözünürlük bakımından azalma gözlemlenmiştir. Bu durum pamuk yağının viskozitesinin, bulutlanma, akma ve soğukta filtre tıkanma noktasının euro dizele göre yüksek olmasına dayandırılmaktadır [99]. Literatüre göre normal şartlarda bitkisel yağların motorda karışım oluşturma yöntemi ile kullanılmasında en fazla %40'a kadar karışım oranının uygun olduğu belirtilmektedir [55]. Ortam sıcaklığına bağlı olarak yakıt sıcaklığının da değişmesi bileşenlerin birbiri içindeki çözünürlüklerini olumsuz yönde etkilemektedir. Bu durumda euro dizel ile pamuk yağı karışımında pamuk yağı yakıt bileşeninin karışım içindeki yüzdesi azalmaktadır. En yüksek sıcaklık değeri olan oda sıcaklığında euro dizel ile pamuk yağı

karışımlarında pamuk yağı karışım yüzdesi arttıkça pamuk yağına doymuş euro dizel fazı meydana geldiği için faz ayrışması gerçekleşmektedir. Bu durum sıcaklık düştükçe daha daha belirgin bir şekilde tespit edilmiştir. Karışımın kararlılığının düşük sıcaklıklardaki davranışı incelendiği en düşük sıcaklık değeri olan $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de tek fazlı bir euro dizel ile pamuk yağı ikili karışımı elde etmek için minimum %95 oranında dizel yakıtının karışıma dâhil edilmesi gerekmektedir. Bu durum euro dizel yakıtı ile pamuk yağı karışımlarının düşük sıcaklıklardaki kullanımını sınırlandırmaktadır.

Pamuk Yağı ile n-Bütanol Eksenleri

Pamuk yağı ile n-bütanol karışımlarında n-bütanolün etanol ve metanole göre uzun karbon zinciri ve ortak çözücü özelliği sayesinde n-bütanol ile pamuk yağı karışımları, euro dizel ile pamuk yağı karışımlarına göre biraz daha iyi çözünürlük özelliği sergilemektedir. Tüm sıcaklık değerlerindeki faz diyagramları saat yönünün tersi yönde incelendiğinde artan n-bütanol karışım oranının artan euro dizel yakıtına göre daha az karışım oranında çözünürlüğe ulaşmaktadır. Bu durum n-bütanolün karışım özelliğinin iyi olmasına dayandırılmaktadır. Ancak sıcaklık düştükçe bu iki bileşenin çözünürlüğünün azaldığı gözlemlenmiştir. Bu durum pamuk yağının soğuk akış özelliği sıcaklıklarının n-bütanole göre yüksek olmasına dayandırılmaktadır.

Tüm sıcaklıklarda pamuk yağına doymuş n-bütanol karışımlarında %10'un üzerindeki oranlarda euro dizel yakıtına göre daha iyi çözünürlük sağlamaktadır. İkili karışımda çözünürlük, karışım içindeki n-bütanol yüzdesinin artmasına bağlı olarak artmaktadır. Bu durumda yakıt karışımının soğuk akış özelliğini olumlu etkilemektedir ve pamuk yağı kullanım oranını artırmaktadır. Ancak n-bütanolün ısıl değerinin pamuk yağına göre düşük olması nedeniyle karışım içindeki oranının artması da motor performansı ve emisyonlarını etkileyeceği değerlendirilmektedir.

n-Bütanol ile Euro Dizel Eksenleri

n-Bütanol ile euro dizel karışımlarında çözünürlük yönünden literatürle paralel sonuçlar elde edilmiştir [34-37]. Alkol molekülleri alkil ve hidroksil içermektedir, alkolde ne kadar karbon atomu olursa dizel yakıtı ile de o kadar kolay

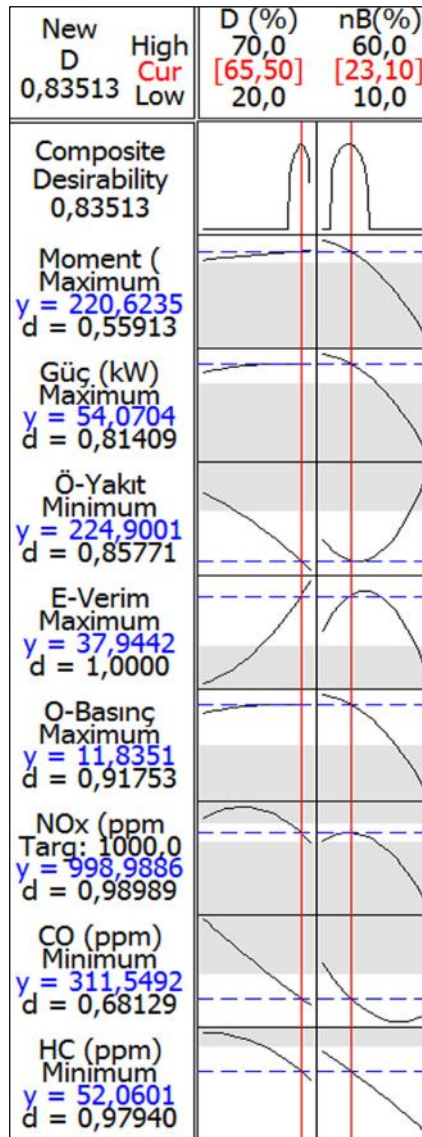
karışabilmektedir. n-Bütanol euro dizel içinde herhangi bir çözücü madde kullanmaksızın her oranda çok iyi bir çözünme sağlamaktadır [33-39]. Ayrıca, n-bütanolün düşük donma noktasına (-89,5 °C) sahip olması da düşük sıcaklıklardaki çözünürlülüğü olumlu yönde etkilemektedir. Alkoller su içeriyorsa, faz ayrışması meydana gelmekte bu durumda yakıt sistemi ve silindirlerde problemlere yol açmaktadır. Ancak, n-bütanolün sudaki çözünürlüğü oldukça düşüktür ve benzin veya dizel yakıtı ile kolaylıkla karışabilmektedir ve uzun süre faz ayrışması olmaksızın kararlılığını korumaktadır. Bu kapsamda yapılan deneylerde faz diyagramlarında görüldüğü gibi n-bütanol ile euro dizel yakıtı karışımlarında herhangi bir faz ayrışması problemi olmamaktadır. Ancak karışım oranı bakımından n-bütanol yüzdesinin artmasına bağlı olarak n-bütanolün ısıl değerinin ve setan sayısının euro dizele göre düşük olması nedeniyle motor performansı ve emisyonlarını etkileyeceği değerlendirilmektedir.

Üçgen Diyagramın İç Kısmı

Üçlü karışım diyagramının iç kısmı üç bileşenin karışım oranını göstermektedir. Değişik sıcaklıklar için çizilen faz diyagramlarında bileşen sıcaklıkları düştükçe üçgenin iç kısmındaki faz (binodal) eğrisi genişlemektedir. Sıcaklığın artması ile eğri bölgesi azalmakta ve bazı konsantrasyonlarda hiç görülmemektedir. Eğri azaldıkça üçgenin içini gösteren üçlü karışım bölgesi genişlemekte ve bu noktalarda da karışabilirlik artmaktadır. Üçlü faz diyagramları üç bileşenin kısmen ya da tamamen çözüldüğü konsantrasyonun bulunmasında kullanıldığından üç bileşenin tamamen çözüldüğü kararlı alanlar ve faz ayrışması şeklinde görülen kararlı olmayan alanlar belirlenmiştir. Bu alanlar sıcaklığa bağlı olarak değiştiğinden bileşenlerin birbirleriyle tamamen çözüldüğü konsantrasyonları temsil etmektedir. Euro dizel, n-bütanol ve pamuk yağı üçlü karışımlarının tamamen çözüldüğü alandaki karışımlarda faz ayrışması gerçekleşmemektedir. Biyoyakıt karışımlarının ile ilgili yapılan çalışmalarda soğukta çalıştırma özellikleri geliştirilmesi gereken bir konu olmaktadır. Buna göre, üçlü karışım bileşenlerinin soğuk akış özellikleri dikkate alınarak ve en kötü koşul olarak belirlenen -10 °C'deki faz diyagramındaki çözünür alanın, yakıt karışımının kararlılığı, soğuk iklim koşullarında dayanıklılığı bakımından diğer sıcaklıklara göre daha iyi performans sergileyeceği değerlendirilmektedir.

6.4 Optimizasyon Sonucu

RSM ile yapılan deney tasarımı seçilen 7 farklı konsantrasyonun deney motorunun maksimum moment devrindeki motor performans ve egzoz emisyon parametrelerine göre kurulan matematiksel modelin R^2 doğruluk değerlerinin güven aralığı içinde yer aldığı tespit edilmiştir. $-10\text{ }^\circ\text{C}$ 'deki üçlü karışım faz diyagramındaki çözünür alan içerisinde motor performansı ve egzoz emisyonu bakımından 8 çıktı parametresinin hedeflenen değerlerini %83,51 oranında karşılayan optimum karışım oranı bulunmuştur. Optimizasyon ekran görüntüsü Şekil 6.2'de görülmektedir. Çıktıların bu değerleri optimizasyon sonucu olarak tanımlanmıştır.



Şekil 6.2: Optimizasyon parametreleri ve değerleri

6.4.1 Optimum ile Doğrulama Deneyi Sonuçlarının Karşılaştırılması

RSM optimizasyonu çıktı değerleri, doğrulama deneyi sonuçları ve matematiksel model R^2 değerleri ile Tablo 6.3'te görülen karşılaştırma yapılmıştır.

Tablo 6.3: Çıktı değerlerinin karşılaştırılması

Çıktı parametresi	Optimizasyon sonucu	Gerçek deney sonucu	Doğrulama oranı	R^2
Moment	220,6 Nm	220,3 Nm	%99,99	%99,99
Efektif güç	54,07 kW	54,20 kW	%99,75	%99,94
Özgül yakıt tüketimi	224,90 g/kWh	240,77 g/kWh	%93,40	%99,22
Efektif verim	%37,9	%37,01	%97,65	%98,54
Ortalama efektif basınç	11,83 bar	11,86 bar	%99,75	%99,94
NO _x	998,9 ppm	915,3 ppm	%91,63	%89,02
CO	311,5 ppm	318 ppm	%97,91	%99,51
HC	52 ppm	51 ppm	%98,07	%97,72

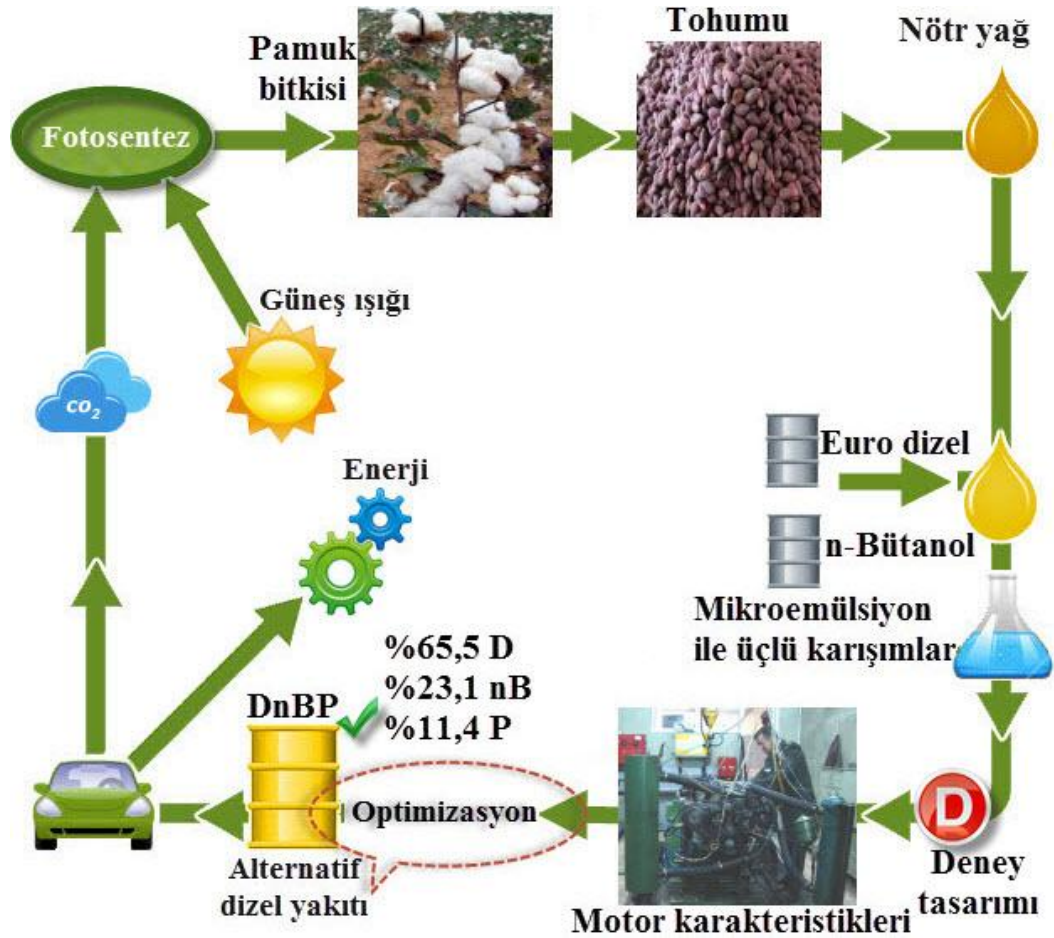
Matematiksel model ile elde edilen R^2 değerlerine göre optimizasyona dâhil edilen parametrelerin optimizasyon sonuçları ile gerçek deney sonuçlarının doğrulama oranları incelendiğinde, tüm parametreler için tam olarak karşıladığı tespit edilmiştir. Bu durum deney tasarımı ve kurulan matematiksel modelin doğruluğunu, yapılan optimizasyonun ise geçerliliğini ortaya koymaktadır. Böylelikle, geliştirilen optimizasyon modeli çalıştırılarak istenilen farklı yakıt karışım oranlarında alternatif motor performansı ve emisyon sonuçları elde edilebilmekte veya istenilen sonuçlara göre girdi olarak verilen karışım oranları belirlenebilmektedir.

6.4.2 Optimum Üçlü Karışımın Oranı

Optimizasyon ve doğrulama deneyi sonuçlarına göre alternatif dizel yakıtı olarak tasarlanan optimum karışımdaki bileşenlerin karışım oranı, **%65,5 oranında euro dizel yakıtı (D)**, **%23,1 oranında n-bütanol (nB)** ve **%11,4 oranında nötr pamuk yağı (P)** olarak tespit edilmiştir. Optimize yakıtı tasarlama süreci sonunda

elde edilen yakıt **DnBP** olarak isimlendirilmiştir. Şekil 6.3'te DnBP yakıtının tasarlanma süreci ve biyoyakıt çevrimi görülmektedir. Bu çevrimde DnBP yakıtının biyoyakıt bileşenlerinden olan pamuk yağının Türkiye'deki üretimi dikkate alınarak başlangıç noktası olarak seçilmiştir ve n-bütanolün de gelecekte yapılacak yatırımlarla üretilmesinin önemi vurgulanmıştır.

Literatürde dizel yakıtı, alkol ve bitkisel yağdan oluşan üçlü karışım yakıt çalışması bulunmadığından optimize yakıtı bileşenleri ikili karışım oranı bakımından ayrı ayrı değerlendirilmiştir. Buna göre, euro dizel ile n-bütanol ve euro dizel ile pamuk yağı karışımlarının biyoyakıt karışım oranının literatürde yapılan çalışmalarda belirtilen ideal aralıkta olduğu kaydedilmiştir [14-24,35,37,78,86,144, 167]. Ayrıca, üçlü bileşenden oluşan optimize yakıtındaki n-bütanol ve nötr pamuk yağı karışım oranının herhangi bir katkı maddesi kullanmaksızın dizel motorunda alternatif yakıt olarak biyoyakıt kullanım oranını artırdığı değerlendirilmiştir.



Şekil 6.3: Optimize yakıtı tasarlama süreci

6.5 Optimum Karışımın Yakıt Analizi

DnBP yakıtının numunesi hazırlanarak yakıt özelliklerinden, yoğunluk, kinematik viskozite, setan sayısı, alt ısıl değer, parlama noktası, bulutlanma noktası, akma noktası, soğukta filtre tıkanma tayini, oksidasyon kararlılığı ve bakır şerit korozyon testi olmak üzere toplam 10 analiz BAP kapsamında TÜBİTAK MAM yakıt analiz laboratuvarında yaptırılmıştır. Referans euro dizel yakıtının yakıt özellikleri Petrol Ofisinden alınmıştır. Tablo 6.4'te DnBP ve euro dizel yakıtının yakıt özellikleri görülmektedir.

Tablo 6.4: DnBP ve euro dizel yakıtının yakıt özellikleri

Analiz	Analiz metodu	Birim	DnBP	Euro dizel
Yoğunluk (15 °C)	EN ISO 12185	kg/m ³	833,8	835,8
Kinematik viskozite (40 °C)	EN ISO 3104	mm ² /s	2,964	2,21
Setan sayısı	EN ISO 5165	-	45,8	55,5
Alt ısıl değer	ASTM D 240	kJ/kg	40758,5	43380
Bulutlanma noktası	EN 23015	°C	-3	-15
Akma noktası	ISO 3016	°C	-18	-25
Soğuk filtre tıkanma noktası	EN 116	°C	-19	-
Parlama noktası	EN ISO 3679	°C	< 42	68
Oksidasyon kararlılığı	EN 14112	Saat	18,7	-
Bakır şerit korozyon	EN ISO 2160	Derece	1a	1a

Yoğunluk ve kinematik viskozite yakıt enjeksiyon sistemi için en önemli parametrelerdendir. Viskozite yakıt enjeksiyon sisteminin çalışmasını ve özellikle düşük sıcaklıklarda yakıtın akışını etkilemektedir. DnBP yakıtının yoğunluk ve kinematik viskozite değerleri dizel motor donanımları (yakıt pompası, enjektörler) ve çalışma şartlarına (püskürtme karakteristikleri) göre değerlendirildiğinde, euro dizel yakıtına yakın değerlerde olduğu tespit edilmiştir.

Yoğunluğun düşük olması karışım içerisindeki en düşük yoğunluğa sahip olan n-bütanolün karışım oranına, kinematik viskozitenin yüksek olması ise karışım içerisindeki en yüksek kinematik viskoziteye sahip olan pamuk yağının karışım oranına bağlı olduğu değerlendirilmektedir.

Setan sayısı dizel motorlar için çok önemli bir parametredir ve tutuşma kalitesinin bir göstergesidir. Modern dizel motorlarında maksimum performansı ve minimum emisyonu sağlamak için kullanılacak yakıtın setan sayısı 40'ın üzerinde olması gerekmektedir [35,146,168]. Ayrıca, EN ve ASTM standartlarına göre ılıman iklimlerde kullanılan dizel yakıtının setan sayısı minimum 51, soğuk iklim bölgelerinde ise minimum 40 olması gerekmektedir [146,169]. Soğuk iklim şartlarına uygun olarak tasarlanan DnBP yakıtının setan sayısı belirtilen sınır değerinin üzerindedir. Ancak euro dizel yakıtına göre setan sayısının %17,47, ısı değeri ise %6,04 düşük olduğu tespit edilmiştir. Bu durumun motor performansında bir miktar azalmaya neden olacağı değerlendirilmiştir.

Ancak yapılan çalışmanın amacına yönelik olarak DnBP yakıtı bulutlanma noktası, akma noktası ve soğukta filtre tıkanma noktası gibi soğuk akış özellikleri bakımından çok iyi seviyede olduğu görülmektedir. Özellikle karışım içerisindeki n-bütanolün çok iyi soğuk akış özelliğine sahip olması ve ortak çözücü özelliği sayesinde tasarlanan yakıttaki bileşenler arasında, soğuk iklim şartlarında faz ayrışması gerçekleşmeyeceği değerlendirilmektedir. Böylelikle karışımın kararlılığı sağlanmış olmaktadır.

Ayrıca, DnBP yakıtının taşınmasında yüksek parlama noktası nedeniyle ilave bir tedbir almaya gerek olmayacaktır ve uzun süre depolanmasında belirleyici bir özellik olan oksidasyon kararlılığının da çok iyi seviyede olduğu tespit edilmiştir. DnBP yakıtının metaller üzerine olan korozyon etkisi de standart değer içerisinde yer almaktadır. Bu özelliklerdeki DnBP yakıtının dizel motorlar için alternatif bir yakıt olabileceği değerlendirilmektedir.

6.6 Matematiksel Modelin Yüzey Grafikleri

RSM ile her bir çıktı parametresi için kurulan matematiksel model yardımıyla yüzey grafikleri çizilmiştir. Yüzey grafiklerinde DnBP yakıtını oluşturan iki ana bileşenin karışım oranına bağlı olarak çıktı parametrelerinin değişimleri katman renkleri ile ifade edilmektedir. Bu grafikler yardımıyla alternatif bir dizel yakıtı olarak tasarlanan DnBP yakıtının doğrulama deneyinden elde edilen her bir çıktı değeri, euro dizel yakıtının çıktı değerleri ile karşılaştırılmıştır.

6.6.1 Motor Performans Parametreleri

Deney motorunun maksimum moment devri için yapılan deney tasarımında çıktı parametresi olarak alınan motor performans parametrelerinden moment, efektif güç, özgül yakıt tüketimi, efektif verim ve ortalama efektif basınç parametreleri için euro dizel yakıtı ve DnBP değerleri Tablo 6.5'te görülmektedir. Bu tabloda ayrıca her iki yakıtın tam yük değişik devirlerdeki motor performans parametrelerinin karşılaştırmasını gösteren ortalama farkları da verilmiştir.

Tablo 6.5: Motor performans parametrelerinin karşılaştırması

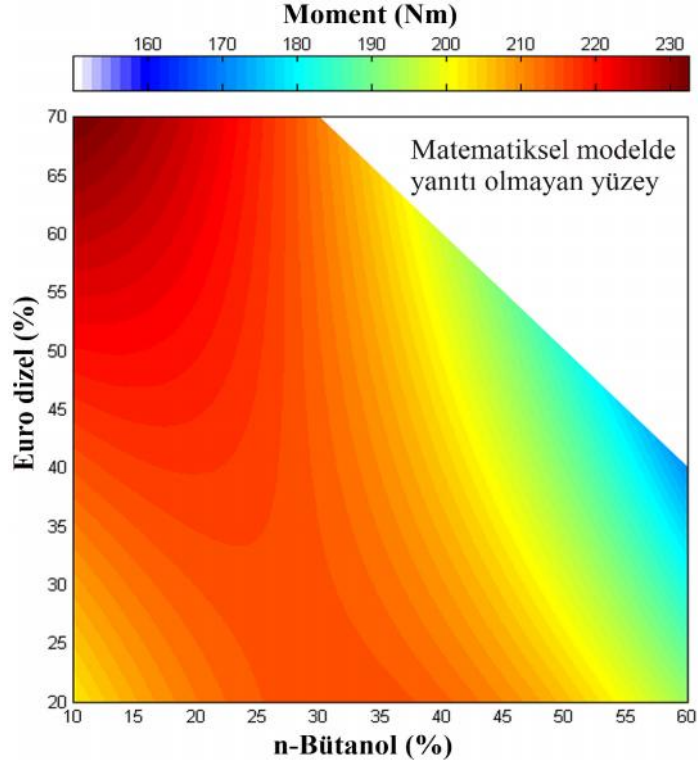
Motor performans parametresi	2200 d/dk.'daki ölçülen ve hesaplanan değerler			Ortalama fark
	Euro dizel	DnBP	Fark	
Moment (Nm)	234,4	220,3	-%6,02	-%6,15
Efektif güç (kW)	57,1	54,20	-%5,08	-%4,49
Özgül yakıt tüketimi (g/kWh)	193,34	240,77	%24,53	%34,47
Efektif verim (%)	42,92	36,99	-%13,82	-%17,29
Ortalama efektif basınç (bar)	12,50	11,86	-%5,12	-%4,49

Yüzey grafikleri kullanılarak her iki yakıtın motor performans parametrelerinin karşılaştırılması aşağıdaki bölümlerde ayrıntılı olarak açıklanmıştır.

6.6.1.1 Moment

Üçlü karışımlardaki euro dizel ve n-bütanol karışım oranına bağlı olarak maksimum moment devrindeki moment değişimleri Şekil 6.4'te gösterilmektedir. RSM ile kurulan matematiksel modelden elde edilen moment çıktısı ile ölçülen deney çıktısı arasındaki doğrulama değeri olan R^2 %99,99 olarak bulunmuştur.

DnBP yakıtıyla elde edilen moment değerinin euro dizel yakıtının moment değerine göre %6,02 azaldığı tespit edilmiştir. Bu devirde euro dizelle elde edilen moment değeri 234,4 Nm, DnBP ile elde edilen moment değeri ise 220,3 Nm'dir. Bu iki yakıt arasındaki tüm devirlerin moment değişimlerinin ortlamasında ise %6,15'lik bir azalma tespit edilmiştir.



Şekil 6.4: Üçlü karışım oranına bağlı moment değişimleri

DnBP yakıtıyla elde edilen moment değerinin euro dizel yakıtına göre azalmasının başlıca nedeni, DnBP yakıtının ısı değerinin euro dizel yakıtına göre %6,04 düşük olmasıdır. DnBP yakıtını oluşturan karışım bileşenlerinden n-bütanol ve pamuk yağının kimyasal yapılarındaki oksijen moleküllerinin varlığı karışımın ısı değerini azaltıcı etki göstermektedir.

DnBP yakıtını oluşturan bileşenlerden n-bütanolün diğer bileşenlere göre yüksek olan gizli buharlaşma ısısı nedeniyle yanma sıcaklığı düşmektedir. Euro dizel, n-bütanol ve pamuk yağının gizli buharlaşma ısıları sırasıyla 250 kJ/kg, 585 kJ/kg ve 210 kJ/kg'dır [35,37,54,91]. Bununla birlikte ısı değerinin de düşük olması yanma sonucu açığa çıkan enerjinin azalmasına ve piston üzerine etkileyen basınç ile faydalı işe dönüşüm oranının da azalmasına neden olmaktadır.

Ayrıca, DnBP yakıtının içeriğinde bulunan pamuk yağının viskozitesinin yüksek olması karışımın viskozite değerini artırmaktadır. Yüksek viskozite, yakıtın enjektörden püskürtülmesini güçleştirmekte ve atomizasyonunu kötüleştirir. Bu durumun yakıtın fiziksel tutuşma gecikme süresinin uzamasına ve yanma öncesi homojen bir karışımın oluşmasını olumsuz yönde etkilediği değerlendirilmektedir.

Belirtilen nedenlerden dolayı DnBP yakıtının mometi değeri referans euro dizel yakıtına göre düşük ölçülmüştür.

Yüzey grafiğinin renk katmanları incelendiğinde, üçlü karışım içindeki euro dizel oranının artmasıyla, karışımın ısıl değerinin de arttığı ve buna paralel olarak momentin yükseldiği yüzey grafiğinde açıkça görülmektedir. Üçlü karışım içinde en düşük ısıl değere sahip olan n-bütanolün karışım içindeki oranının %35'den daha fazla olduğu alanlarda moment çok düşüş göstermektedir.

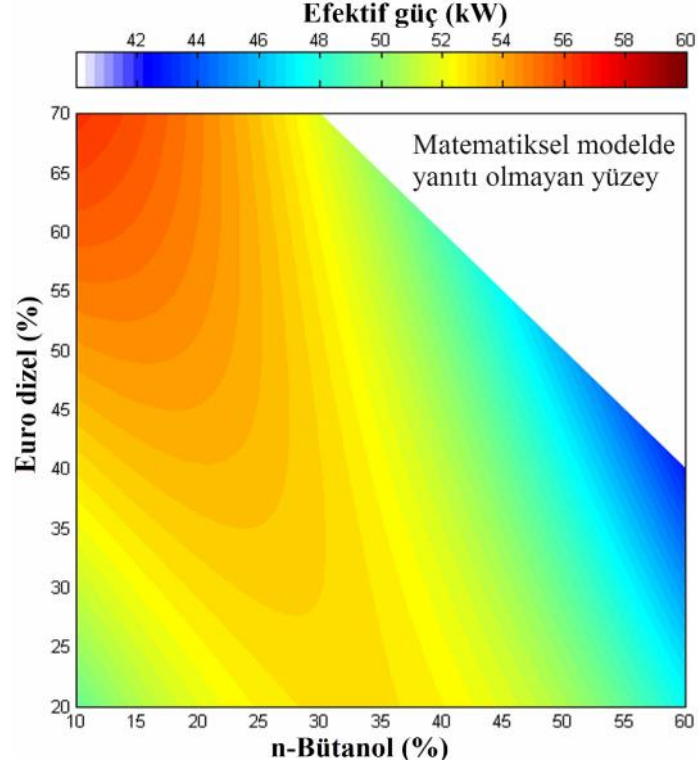
Grafikte n-bütanol ve euro dizel karışım oranlarının sırasıyla %15 ve %25'in altındaki tüm karışım oranlarında da moment değerlerinde düşüş olduğu görülmektedir. Bu sonuç, n-bütanolün alternatif bir dizel yakıtı olarak kullanıldığı önceki çalışmalarla paralellik göstermektedir [78,83,99]. Ayrıca, bu karışım bölgesinde euro dizel karışım oranının azalması, pamuk yağı karışım oranının artmasına neden olmaktadır. Bu durumda pamuk yağının düşük ısıl değeri ve yüksek viskozitesi momenti azaltıcı yönde etki göstermektedir.

6.6.1.2 Efektif Güç

Üçlü karışımlardaki euro dizel ve n-bütanol karışım oranına bağlı olarak maksimum moment devrindeki efektif güç değişimleri Şekil 6.5'te gösterilmektedir. RSM ile kurulan matematiksel modelden elde edilen efektif güç çıktısı ile ölçülen deney çıktısı arasındaki doğrulama değeri olan R^2 %99,94 olarak bulunmuştur.

DnBP yakıtıyla elde edilen efektif güç değerinin euro dizel yakıtının efektif güç değerine göre %5,08 azaldığı tespit edilmiştir. Bu devirde euro dizelle elde edilen efektif güç değeri 57,1 kW, DnBP ile elde edilen efektif güç değeri ise 54,20 kW'dır. Bu iki yakıt arasındaki tüm devirlerin efektif güç değişimlerinin ortlamasında ise %4,49'luk bir azalma tespit edilmiştir.

Maksimum moment devri için efektif güç değeri motor test cihazı tarafından eşitlik (5.6)'ya göre hesaplanmaktadır. Yani ölçülen moment değeri ile efektif güç değeri arasında doğrusal bir ilişki bulunmaktadır. Bu noktada, euro dizel yakıtı ile karşılaştırıldığında DnBP yakıtı ile elde edilen moment ve efektif güç değerlerinde meydana gelen düşüşler paralellik göstermektedir.



Şekil 6.5: Üçlü karışım oranına bağlı efektif güç değişimleri

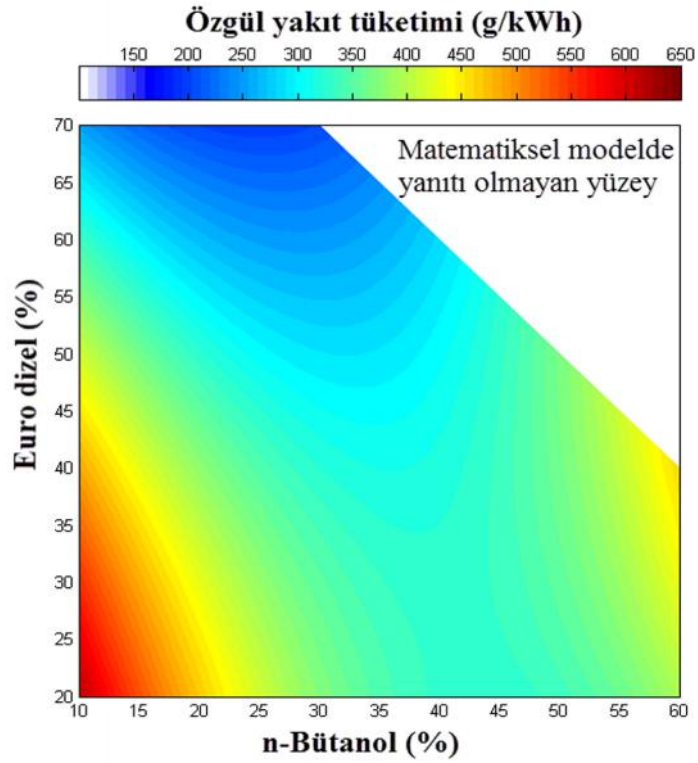
DnBP yakıtının ısıl değerinin euro dizel yakıtına göre %6,04 düşük olması, efektif güç üzerinde düşürücü bir etki göstermektedir. Isıl değerdeki bu azalma DnBP yakıtının içerisinde %23,1 oranında bulunan n-bütanolün düşük ısıl değeri ile ilişkilendirilmiştir. Ayrıca, DnBP yakıtının içeriğinde bulunan pamuk yağının viskozitesinin yüksek olması karışımın viskozite değerini artırmaktadır. Yüksek viskozite, yakıtın enjektörden daha iri zerrecikler halinde püskürtülmesine sebep olmaktadır [32]. Bu ise dizel motorlarda yanmayı etkileyen en önemli parametre olan tutuşma gecikmesini uzatmakta ve böylece yanmanın kötüleşmesine sebep olmaktadır. Belirtilen nedenlerden dolayı DnBP yakıtının efektif güç değeri referans euro dizel yakıtına göre düşük ölçülmüştür.

Şekil 6.5 incelendiğinde, üçlü karışım içindeki euro dizel oranının artmasıyla, karışımın ısıl değerinin de arttığı ve buna paralel olarak efektif gücün yükseldiği yüzey grafiğindeki renk katmanlarından görülmektedir. Kimyasal yapısındaki oksijen nedeniyle ısıl değeri düşük olan n-bütanol ve yüksek viskoziteye sahip pamuk yağının karışım oranının artması efektif gücün azalmasına neden olmaktadır. Üçlü karışım içerisindeki n-bütanolün %35'in üzerindeki tüm karışım oranlarında efektif güç değerlerinde düşüş göstermektedir. Ayrıca n-bütanol ve euro dizel

karışım oranlarının sırasıyla %20 ve %35'in altındaki tüm karışım oranlarında da efektif güç değerlerinde düşüş olduğu görülmektedir.

6.6.1.3 Özgül Yakıt Tüketimi

Üçlü karışımlardaki euro dizel ve n-bütanol karışım oranına bağlı olarak maksimum moment devrindeki özgül yakıt tüketimi değişimleri Şekil 6.6'da gösterilmektedir. RSM ile kurulan matematiksel modelden elde edilen özgül yakıt tüketimi çıktısı ile ölçülen deney çıktısı arasındaki doğrulama değeri olan R^2 %99,22 olarak bulunmuştur.



Şekil 6.6: Üçlü karışım oranına bağlı özgül yakıt tüketimi değişimleri

DnBP yakıtıyla elde edilen özgül yakıt tüketimi değerinin euro dizel yakıtının özgül yakıt tüketimi değerine göre %24,53 artış gösterdiği tespit edilmiştir. Bu devirde euro dizel yakıtı ile elde edilen yakıt tüketimi değeri 193,5 g/kWh, DnBP ile elde edilen yakıt tüketimi değeri ise 240 g/kWh'dır. Bu iki yakıt arasındaki tüm devirlerin özgül yakıt tüketimi değişimlerinin ortlamasında ise %34,47'lik bir artış tespit edilmiştir.

Maksimum moment devrinde, yanma odasına hacimsel olarak püskürtülen euro dizel ve DnBP yakıt miktarlarının aynı olması durumunda, açığa çıkacak enerji miktarı euro dizel yakıtı için daha fazla olacaktır. Bu nedenle motordan aynı efektif gücü alabilmek için kütleli olarak daha fazla DnBP yakıtı kullanılması gerekmektedir. Bu artışın başlıca nedeni, DnBP yakıtının ısı değeri euro dizel yakıtına göre %6,04 düşük olmasıdır.

Tablo 6.4'te görüldüğü gibi DnBP yakıtının setan sayısı euro dizel yakıtına göre %17,47 daha azdır. Düşük setan sayısı, tutuşma gecikmesi süresinin uzamasına neden olduğundan dolayı yanma odasında ilk alev çekirdeğinin oluşmasına kadar geçen sürede DnBP yakıtının püskürtme miktarının artmasına neden olmaktadır. Yanmanın geç başlaması yanma süresini uzatıcı etki göstereceği için bu süre içerisindeki motor parçalarına ısı transfer miktarı da artacaktır. Bundan dolayı, silindir içerisindeki efektif güce dönüşebilecek faydalı enerjinin azalması, DnBP yakıtının özgül yakıt tüketim değerinin artmasına neden olduğu değerlendirilmektedir.

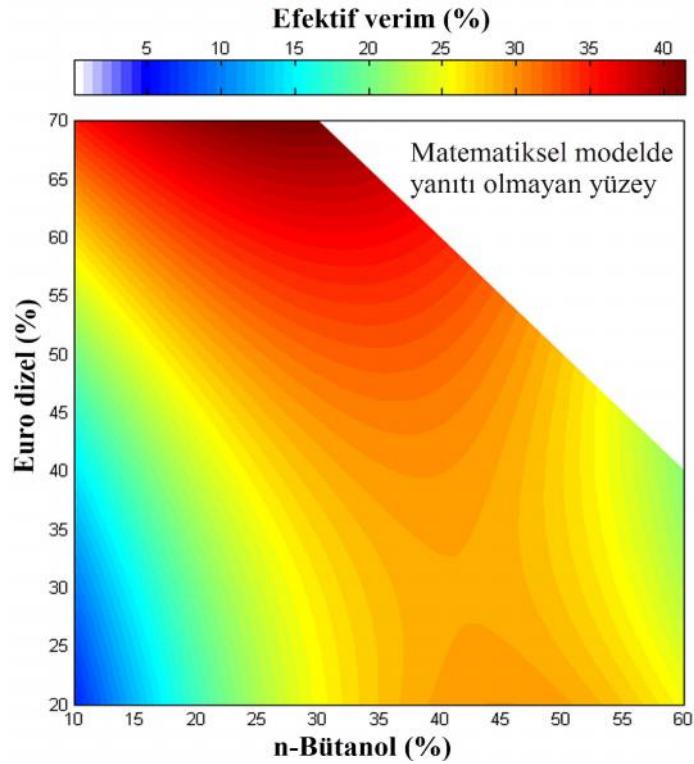
Şekil 6.6'daki yüzey grafiği incelendiğinde, üçlü karışım içerisindeki pamuk yağı oranının artmasıyla, karışımın özgül yakıt tüketimi değerlerinde büyük bir miktarda artış meydana geldiği görülmektedir. Ayrıca, grafikteki üçlü karışımlar arasında euro dizel karışım oranının %50'den fazla ve n-bütanol karışım oranının %40'ın altında olduğu tüm karışımlarda özgül yakıt tüketim değerlerinde büyük oranda düşüş görülmektedir. Bunun nedeni, euro dizel yakıtının ısı değerinin diğer iki bileşene göre yüksek olmasıdır. Üçlü karışım içerisindeki n-bütanol oranının %40'tan yüksek olduğu tüm karışımlarda özgül yakıt tüketim değerlerinde artış görülmektedir. Bunun nedeni n-bütanolün ısı değerinin diğer iki bileşene göre daha düşük olmasıdır.

Grafikteki n-bütanol ve euro dizel karışım oranlarının sırasıyla %20 ve %45'in altındaki tüm karışım oranlarında da özgül yakıt tüketim değerlerinde artış olduğu görülmektedir. Bu artışın nedeni belirtilen karışımlardaki pamuk yağı oranının yüksek olmasıdır. Çünkü üçlü karışımlar içerisinde en yüksek yoğunluk ve viskoziteye sahip bileşen pamuk yağıdır. Üçlü karışım içerisindeki pamuk yağı karışım oranının %50'den daha fazla olması Tablo 5.9'da görüldüğü gibi karışımın yoğunluk ve viskozitesini büyük bir miktarda artırmaktadır. Yüksek yoğunluk ve

viskozite mekanik yakıt enjeksiyon sistemlerinde pompalama, püskürtme karakteristiklerini olumsuz yönde etkileyerek yanma verimini düşürücü etki göstermektedir ve bu durum da özgül yakıt tüketimini artırmaktadır.

6.6.1.4 Efektif Verim

Üçlü karışımlardaki euro dizel ve n-bütanol karışım oranına bağlı olarak maksimum moment devrindeki efektif verim değişimleri Şekil 6.7’de gösterilmektedir. RSM ile kurulan matematiksel modelden elde edilen efektif verim çıktısı ile ölçülen deney çıktısı arasındaki doğrulama değeri olan R^2 %98,54 olarak bulunmuştur.



Şekil 6.7: Üçlü karışım oranına bağlı efektif verim değişimleri

DnBP yakıtıyla elde edilen efektif verim değerinin euro dizel yakıtının efektif güç değerine göre %13,82 azaldığı tespit edilmiştir. Bu devirde euro dizelle elde edilen efektif verim değeri %42,92, DnBP ile elde edilen efektif verim değeri ise %36,99'dır. Bu iki yakıt arasındaki tüm devirlerin efektif verim değişimlerinin ortalamasında ise %17,29'luk bir azalma tespit edilmiştir.

DnBP yakıtının Tablo 6.4'te belirtilen yakıt özellikleri incelendiğinde euro dizele göre ısıl değerinin ve setan sayısının düşüklüğü, viskozite değerinin yüksek olması yanma sonunda açığa çıkan enerjinin azalmasına ve faydalı işe dönüşüm oranının düşmesine neden olmaktadır. Bu durum DnBP yakıtı ile elde edilen efektif verim değerinin euro dizel yakıtına göre düşmesine neden olduğu değerlendirilmektedir.

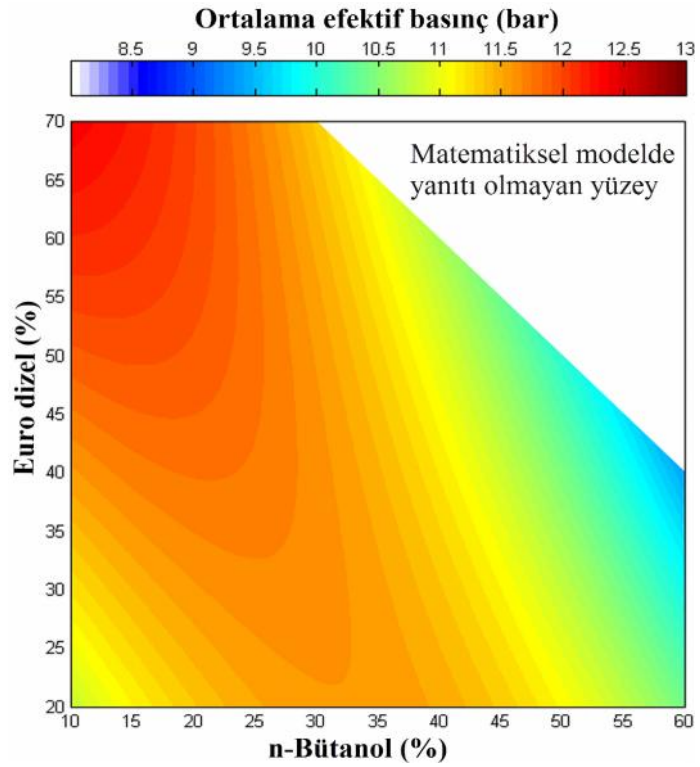
Yakıtın faydalı işe dönüşüm oranının bir göstergesi olan efektif verimi etkileyen en önemli motor performans parametresi özgül yakıt tüketimidir. Şekil 6.6'da özgül yakıt tüketimi değerlerinin en az olduğu bölgelerde efektif verim değerlerinin Şekil 6.7'de maksimum olduğu görülmektedir. Buna paralel olarak her iki yüzey grafiği karşılaştırıldığında, özgül yakıt tüketim değerlerinin arttığı bölgelerde efektif verim değerlerindeki düşüş açıkça görülmektedir.

Şekil 6.7'deki yüzey grafiği incelendiğinde, üçlü karışım içerisindeki pamuk yağı oranının artmasıyla, karışımın efektif verim değerlerinde büyük bir miktarda azalma meydana geldiği görülmektedir. Ayrıca, grafikteki üçlü karışımlar arasında euro dizel karışım oranının %50'den fazla ve n-bütanol karışımı oranlarının ise %30-%55 aralığında olduğu tüm karışımlarda efektif verim değerlerinde büyük oranda artış görülmektedir. Bunun nedeni, euro dizel yakıtının ısıl değerinin diğer iki bileşene göre yüksek olmasıdır. Üçlü karışım içerisindeki n-bütanol oranının %55'den yüksek olduğu tüm karışımlarda, n-bütanolün yüksek gizli buharlaşma ısısından dolayı efektif verim değerlerinde düşüş meydana gelmektedir.

Şekil 6.7'nin tümü incelendiğinde, n-bütanol ve euro dizel karışım oranlarının sırasıyla %20 ve %45'in altındaki tüm oranlarında efektif verim değerlerinde büyük düşüş olduğu görülmektedir. Bu düşüş karışımlardaki pamuk yağı oranının yüksek olmasından kaynaklanmaktadır. Çünkü üçlü karışımlar içerisinde en yüksek yoğunluk ve viskoziteye sahip bileşen pamuk yağıdır. Üçlü karışım içerisindeki pamuk yağı karışım oranının %50'den daha fazla olması Tablo 5.9'da görüldüğü gibi karışımın yoğunluk ve viskozitesini büyük bir miktarda artırmaktadır. Yüksek yoğunluk ve viskozite mekanik yakıt enjeksiyon sistemlerinde pompalama ve püskürtme karakteristiklerini olumsuz yönde etkilemekte ve yanma verimini düşürücü etki göstermektedir ve bu durum da efektif verimi azaltmaktadır.

6.6.1.5 Ortalama Efektif Basınç

Üçlü karışımlardaki euro dizel ve n-bütanol karışım oranına bağlı olarak maksimum moment devrindeki efektif verim değişimleri Şekil 6.8’de gösterilmektedir. RSM ile kurulan matematiksel modelden elde edilen ortalama efektif basınç çıktısı ile ölçülen deney çıktısı arasındaki doğrulama değeri olan R^2 %99,94 olarak bulunmuştur.



Şekil 6.8: Üçlü karışım oranına bağlı ortalama efektif basınç değişimleri

DnBP yakıtıyla elde edilen ortalama efektif basınç değerinin euro dizel yakıtının ortalama efektif basınç değerine göre %5,12 azaldığı tespit edilmiştir. Bu devirde euro dizelle elde edilen ortalama efektif basınç değeri 12,50 bar, DnBP ile elde edilen ortalama efektif basınç değeri ise 11,86 bar’dır. Bu iki yakıt arasındaki tüm devirlerin ortalama efektif basınç değişimlerinin ortlamasında ise %4,49’luk bir azalma tespit edilmiştir.

Yakıt özellikleri incelendiğinde, DnBP yakıtının euro dizele göre ısıl değerinin az ve viskozite değerinin yüksek olması yanma sonunda açığa çıkan enerjinin ve

krank milini çevirmek için piston üzerine çevrim boyunca etki eden basınçların ortalaması olarak tanımlanan ortalama efektif basıncın azalmasına neden olmaktadır. Bunun sonucunda, DnBP yakıtı ile elde edilen ortalama efektif basınç değeri euro dizel yakıtı karşılaştırıldığında düşük olduğu tespit edilmiştir.

Ortalama efektif basınç, efektif güç ve motor devrinin bir fonksiyonudur. Yüzey grafikleri maksimum moment devri için çizildiğinden ortalama efektif basıncı belirleyen tek motor performans parametresi efektif güçtür. Şekil 6.5 efektif güç ile Şekil 6.8 ortalama efektif basınç yüzey grafikleri karşılaştırıldığında her iki şekilde de üçlü karışım içerisindeki euro dizel ve n-bütanol oranları ile elde edilen değişimler benzerlik göstermektedir.

Şekil 6.8'deki yüzey grafiği incelendiğinde, grafikteki üçlü karışımlar arasında euro dizel karışım oranının %40'dan fazla ve n-bütanol karışımı oranlarının ise %30'dan daha az olduğu tüm karışımlarda ortalama efektif basınç değerlerinde artış görülmektedir. Bunun nedeni, euro dizel yakıtının ısı değeri diğer iki bileşene göre yüksek olmasıdır. Üçlü karışım içerisindeki n-bütanol oranının %40'tan yüksek olduğu tüm karışımlarda, ortalama efektif basınç değerlerinde büyük oranda düşüş meydana gelmektedir. Bu azalmanın n-bütanolün yüksek gizli buharlaşma ısısı ve düşük ısı değeriyle ilgili olduğu değerlendirilmektedir. Karışımın tutuşması esnasında, n-bütanolün sahip olduğu yüksek gizli buharlaşma ısısı nedeniyle yanma odasında ki soğutma etkisi diğer iki bileşene göre daha yüksektir.

Ayrıca, n-bütanol ve euro dizel karışım oranlarının sırasıyla %15 ve %30'un altındaki tüm oranlarında ortalama efektif basınç değerlerinde düşüş olduğu görülmektedir. Bu düşüş, üçlü karışım içerisinde en yüksek yoğunluk ve viskoziteye sahip bileşen olan pamuk yağı oranının yüksek olmasından kaynaklanmaktadır. Yüksek yoğunluk ve viskozite enjektörde püskürtme karakteristiklerini olumsuz yönde etkilemekte ve yanma sonu elde edilen basıncı düşürücü etki göstermektedir.

6.6.2 Egzoz Emisyon Parametreleri

Deney motorunun maksimum moment devri için yapılan deney tasarımında çıktı parametresi olarak alınan egzoz emisyon parametrelerinden NO, NO₂, NO_x, CO, HC, CO₂ ve O₂ emisyonu için euro dizel yakıtı ve DnBP değerleri Tablo 6.6'da görülmektedir. Bu tabloda ayrıca her iki yakıtın tam yük değişik devirlerdeki emisyon parametrelerinin karşılaştırmasını gösteren ortalama farkları da verilmiştir.

Tablo 6.6: Egzoz emisyon parametrelerinin karşılaştırması

Egzoz emisyon parametresi	2200 d/dk.'daki ölçülen değerler			Ortalama fark
	Euro dizel	DnBP	Fark	
NO (ppm)	1018	896	-%11,98	-%4,92
NO ₂ (ppm)	14,20	19,30	%35,92	%54,98
NO _x (ppm)	1032,20	915,30	-%11,33	-%4,09
CO (ppm)	580	318	-%45,17	-%10,67
HC (ppm)	275	51	-%81,45	-%75,59
CO ₂ (%)	9,93	8,8	-%11,38	-%6,35
O ₂ (%)	7,41	7,9	%6,61	%14,53

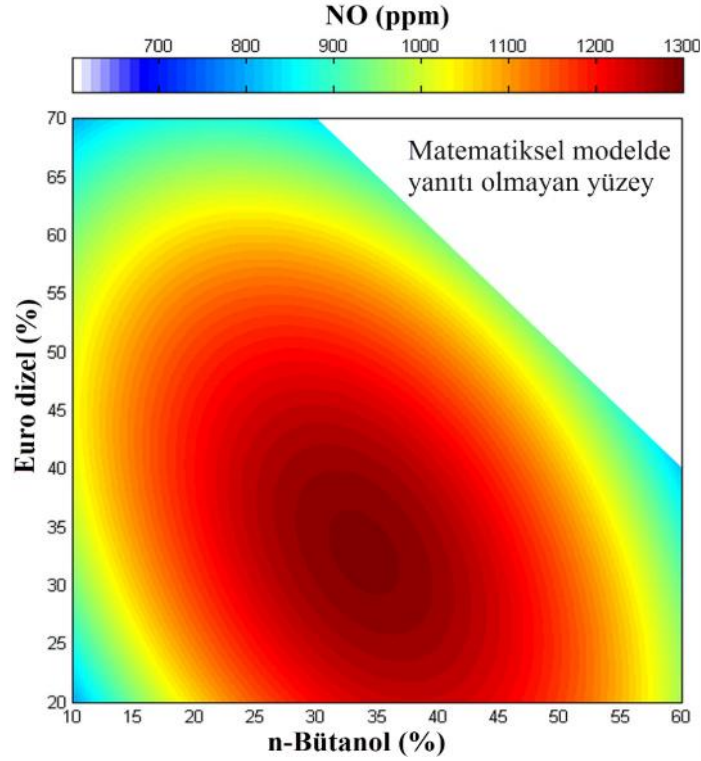
Yüzey grafikleri kullanılarak her iki yakıtın motor performans parametrelerinin karşılaştırılması aşağıdaki bölümlerde ayrıntılı olarak açıklanmıştır.

6.6.2.1 NO Emisyonu

Dizel motorlardan kaynaklanan egzoz emisyonları içerisinde azotun (N₂) sekiz farklı oksidasyonu bulunmaktadır. Bu oksidasyonların hacimsel olarak %90'ını NO, %5'ini NO₂ ve %5'ini nitrik oksitler (N₂O, N₂O₃, ve N₂O₅) oluşturmaktadır [32]. Bu oksidasyonların tamamı NO_x olarak adlandırılmaktadır.

Üçlü karışımlardaki euro dizel ve n-bütanol karışım oranına bağlı olarak maksimum moment devrindeki NO emisyonu değişimleri Şekil 6.9'da

gösterilmektedir. RSM ile kurulan matematiksel modelden elde edilen NO emisyonu çıktısı ile ölçülen deney çıktısı arasındaki doğrulama değeri olan R^2 %88,57 olarak bulunmuştur.



Şekil 6.9: Üçlü karışım oranına bağlı NO emisyonu değişimleri

DnBP yakıtıyla elde edilen NO emisyonu değerinin euro dizel yakıtının NO emisyonu değerine göre %11,98 azaldığı tespit edilmiştir. Bu devirde euro dizelle elde edilen NO emisyonu değeri 1018 ppm, DnBP ile elde edilen NO emisyonu değeri ise 896 ppm'dir. Bu iki yakıt arasındaki tüm devirlerin NO emisyonu değeri değişimlerinin ortlamasında ise %4,92'lik bir azalma tespit edilmiştir.

DnBP yakıtının euro dizel ile karşılaştırıldığında daha düşük setan sayısına sahip olması, dizel motorlarda yanmayı etkileyen en önemli parametre olan tutuşma gecikme süresini artırıcı yönde etki göstermektedir. Tutuşma gecikmesinin artması, tutuşma gecikmesi süresince yanma odasına püskürtülen yakıt miktarının artmasına ve ilk alev çekirdeğinin oluşmasıyla karışımın büyük bir hızla yanmasına neden olmaktadır. Bu etkinin, yanma sonu sıcaklığı ve basıncını artırmasıyla NO emisyonu oluşumunu artırdığı değerlendirilmektedir. Bunun yanında, DnBP yakıtının ısıl değerinin euro dizele göre daha düşük olması yanma sonu sıcaklığını azaltıcı etki göstermektedir. Ayrıca, üçlü karışımı oluşturan bileşenlerden en yüksek gizli

buharlaşma ısısına sahip olan n-bütanolün alev sıcaklığını düşürerek yanma sonu sıcaklığını azalttığı değerlendirilmektedir. DnBP yakıtı içerisinde pamuk yağıının bulunması karışımın viskozitesini artırdığı, viskozitenin artmasının ise yanma verimini olumsuz yönde etkilediğı ve böylece yanma sonu sıcaklığını düşürdüğü düşünülmektedir. DnBP yakıtının yakıt özelliklerine bağılı olarak yanma üzerindeki etkilerinin tamamı birlikte değerlendirildiğinde, NO emisyonun azalmasında düşük ısıl değer, yüksek gizli buharlaşma ısısı ve viskozitenin düşük setan sayısından daha etkin rol oynadığı değerlendirilmektedir.

şekil 6.9'daki yüzey grafiği incelendiğinde, özellikle %35 euro dizel ve %35 n-bütanol karışım oranında en yüksek NO emisyon değerinin oluştuğu görölmektedir. Bu karışım oranına en yakın ve deney tasarımında yer alan 4 numaralı yakıt karışımının Tablo 5.9'da verilen yakıt özellikleri incelendiğinde, setan sayısının (35,99) düşüklüğünün NO emisyonunu artırdığı değerlendirilmektedir. Fakat 5 ve 7 numaralı yakıt karışımının setan sayılarının (31,03 ve 29,66) 4 numaralı karışımından daha düşük olmasına rağmen, çok düşük setan sayısı tutuşma gecikmesi süresini çok uzatacağından yanma piston Ü.Ö.N'ye çok yaklaştıında başlayacaktır. Bu durum yanma süresini uzatacak ve yanma genleşme zamanında piston A.Ö.N'ye gelinceye kadar devam edecektir. Böylece, yanma süresince motor parçalarına transfer edilen ısı miktarı artış gösterecek ve yanma sıcaklığının düşmesiyle NO emisyonu oluşumu azalacaktır.

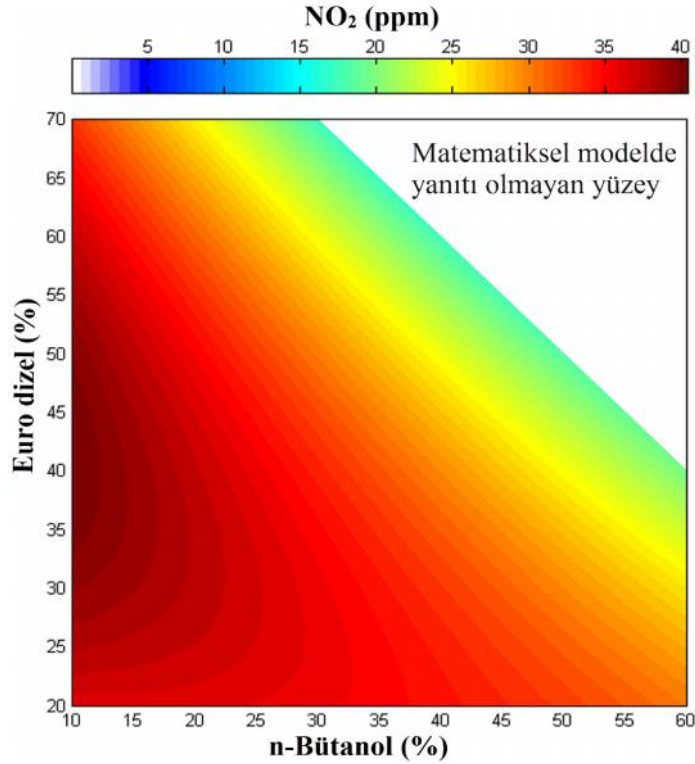
Ayrıca, euro dizel karışım oranının %65'den fazla ve n-bütanol karışım oranının %25'den az olduğu tüm karışımelerde NO emisyonunun büyük bir ölçüde düştüğü yüzey grafiğinde görölmektedir. Bunun nedeninin karışım içerisindeki euro dizel karışım oranına bağılı olarak setan sayısının artışından kaynaklandığı düşünülmektedir. Yüksek setan sayısı tutuşma gecikmesi süresini azaltarak NO oluşumunu azaltıcı etki göstermektedir [109].

Euro dizel karışım oranının %25'den ve n-bütanol karışım oranının %15'den az olduğu tüm karışımelerde NO emisyonunun büyük bir ölçüde düştüğü yüzey grafiğinde görölmektedir. Bunun nedeninin karışım içerisindeki pamuk yağı karışım oranına bağılı olarak yoğunluk ve viskozitenin büyük ölçüde artışından kaynaklandığı düşünülmektedir. En yüksek pamuk yağı içeren 6 numaralı yakıt karışımının viskozitesinin (8,53 mm²/s) diğer karışım oranlarına göre oldukça yüksek olduğu

Tablo 5.9’da görülmektedir. Yüksek yoğunluk ve viskozite enjektörde püskürtme karakteristiklerini olumsuz yönde etkilemekte ve yanma verimini ve buna paralel olarak yanma sonu sıcaklığını düşürdüğü değerlendirilmektedir.

6.6.2.2 NO₂ Emisyonu

Üçlü karışımlardaki euro dizel ve n-bütanol karışım oranına bağlı olarak maksimum moment devrindeki NO₂ emisyonu değişimleri Şekil 6.10’da gösterilmektedir. RSM ile kurulan matematiksel modelden elde edilen NO₂ emisyonu çıktısı ile ölçülen deney çıktısı arasındaki doğrulama değeri olan R² %97,23 olarak bulunmuştur.



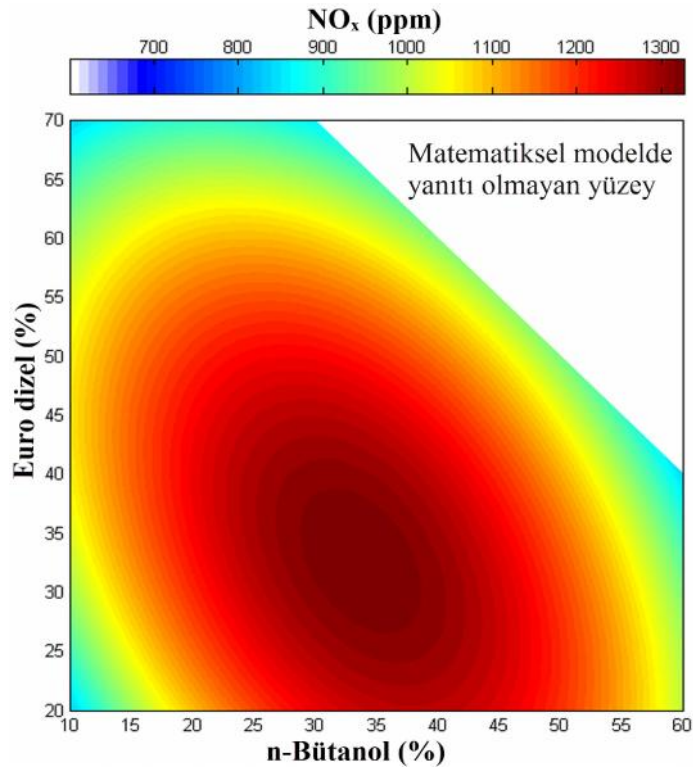
Şekil 6.10: Üçlü karışım oranına bağlı NO₂ emisyonu değişimleri

DnBP yakıtıyla elde edilen NO₂ emisyonu değerinin euro dizel yakıtının NO₂ emisyonu değerine göre %35,92 artış gösterdiği tespit edilmiştir. Bu devirde euro dizelle elde edilen NO₂ emisyonu değeri 14,20 ppm, DnBP ile elde edilen NO₂ emisyon değeri ise 19,30 ppm’dir. Bu iki yakıt arasındaki tüm devirlerin NO₂ emisyonu değerleri değişimlerinin ortlamasında ise %54,98’lik bir artış tespit edilmiştir.

Şekil 6.10'daki yüzey grafiği incelendiğinde, üçlü karışım içerisindeki pamuk yağı oranının artmasıyla, karışımın NO₂ emisyon değerlerinde büyük bir miktarda artış meydana geldiği görülmektedir. Ayrıca, grafikteki üçlü karışımlar arasında euro dizel karışım oranının %25 ile %65 arasında ve n-bütanol karışımı oranının ise %25'in altındaki tüm karışımlarda NO₂ emisyon değerlerinde büyük oranda artış görülmektedir. Üçlü karışım içerisindeki n-bütanol oranının %25'den yüksek olduğu tüm karışımlarda, n-bütanolün düşük ısıl değeri ve yüksek gizli buharlaşma ısısından dolayı NO₂ değerlerinde düşüş meydana gelmektedir. DnBP yakıtının NO₂ emisyon değerinde ise karışım içerisindeki %65,5 euro dizel ve %23,1 n-bütanol oranına bağlı olarak artış görülmektedir.

6.6.2.3 NO_x Emisyonu

Üçlü karışımlardaki euro dizel ve n-bütanol karışım oranına bağlı olarak maksimum moment devrindeki NO_x emisyonu değişimleri Şekil 6.11'de gösterilmektedir. RSM ile kurulan matematiksel modelden elde edilen NO_x emisyonu çıktısı ile ölçülen deney çıktısı arasındaki doğrulama değeri olan R² %89,02 olarak bulunmuştur.



Şekil 6.11: Üçlü karışım oranına bağlı NO_x emisyonu değişimleri

NO_x'in genel olarak, azot oksit (NO) ve azot dioksit (NO₂) olmak üzere en genel iki bileşeni vardır. NO_x oluşumu genel olarak, ısı NO_x, yakıt NO_x ve hızlı NO_x olmak üzere üç metotla tanımlanmaktadır. Bir yakıttan oluşan bütün NO_x emisyonlarına, bu üç metodun her biri katkıda bulunur. Dizel yakıtının oluşturduğu NO_x emisyonlarının ana sebebi ısı NO_x oluşumudur.

Şekil 6.9'daki NO emisyonu yüzey grafiği ile Şekil 6.11'deki NO_x emisyonu yüzey grafikleri incelendiğinde her iki grafiğinde aynı eğilimde olduğu tespit edilmiştir. Bunun nedeni ise NO_x emisyonunun %95'ini NO emisyonunun oluşturmasıdır.

DnBP yakıtıyla elde edilen NO_x emisyonu değerinin euro dizel yakıtının NO_x emisyonu değerine göre %11,33 azaldığı tespit edilmiştir. Bu devirde euro dizelle elde edilen NO_x emisyonu değeri 1032,20 ppm, DnBP ile elde edilen efektif güç değeri ise 915,30 ppm'dir. Bu iki yakıt arasındaki tüm devirlerin NO_x emisyonu değeri değişimlerinin ortlamasında ise %4,09'luk bir azalma tespit edilmiştir. Bu azalma NO emisyonundaki azalma ile paralellik göstermektedir. DnBP yakıtı içerisindeki n-bütanol karışım oranı yanma odasındaki oksijen oranının artmasına ve karışımın düşük setan sayısının yol açtığı uzun tutuşma gecikmesi ile yanma sıcaklığının artmasına neden olmaktadır. Ancak karışımın düşük ısı değeri ve n-bütanolün gizli buharlaşma ısısından dolayı alev sıcaklığının NO_x emisyonu oluşumu açısından düşük olmasına neden olduğu değerlendirilmektedir.

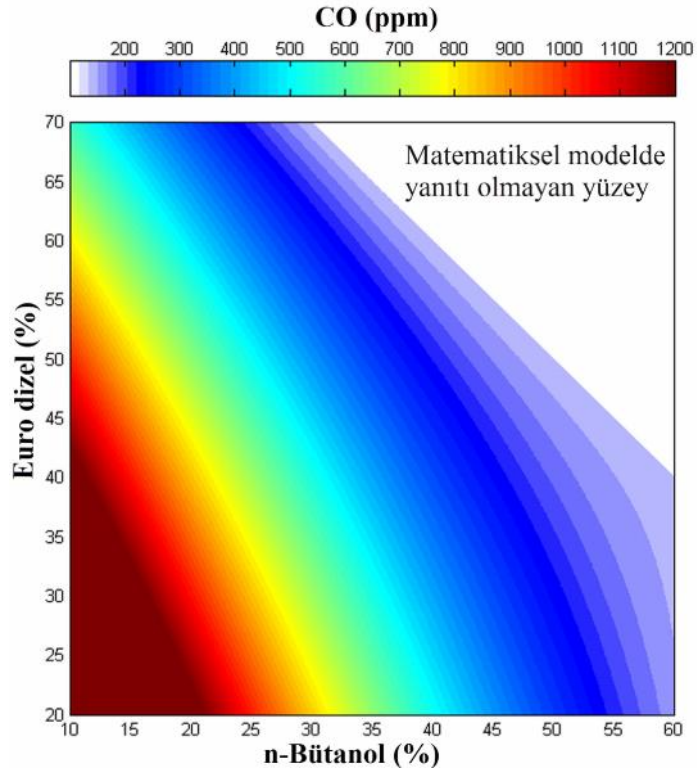
6.6.2.4 CO Emisyonu

Üçlü karışımlardaki euro dizel ve n-bütanol karışım oranına bağlı olarak maksimum moment devrindeki CO emisyonu değişimleri Şekil 6.12'de gösterilmektedir. RSM ile kurulan matematiksel modelden elde edilen CO emisyonu çıktısı ile ölçülen deney çıktısı arasındaki doğrulama değeri olan R² %99,51 olarak bulunmuştur.

DnBP yakıtıyla elde edilen CO emisyonu değerinin euro dizel yakıtının CO emisyonu değerine göre %45,17 azaldığı tespit edilmiştir. Bu devirde euro dizelle elde edilen CO emisyon değeri 580 ppm, DnBP ile elde edilen CO emisyon değeri

ise 318 ppm'dir. Bu iki yakıt arasındaki tüm devirlerin CO emisyonu değişimlerinin ortlamasında ise %10,67'lik bir azalma tespit edilmiştir.

Üçlü karışım içerisindeki pamuk yağı ($C_{55}H_{102}O_6$) ve n-bütanolün (C_4H_9OH) kimyasal yapılarındaki kütle olarak oksijen miktarı sırasıyla %8,63 ve %21,62'dir [24,74]. DnBP yakıtının hesaplanan kütle O₂ konsantrasyonu ise %6,02'dir. Yanma odasındaki karbon atomları yeterli miktarda oksijen ile oksidasyona uğrayarak tam yanma ürünü olan CO₂'yi oluşturur. Oksijen eksikliğinden dolayı (zengin karışım) karbon atomları yanma süresince yeterli miktarda oksijen ile reaksiyona giremediğinden eksik yanma ürünü olan CO oluşur. Buna göre DnBP yakıtı ile elde edilen CO emisyonunun euro dizele göre azalmasının temel nedeni, yakıt bileşenlerinden pamuk yağı ve n-bütanolün içeriğindeki oksijen miktarıdır. Yanma denklemleri (3.1) ve (3.2) kullanılarak hesaplanan pamuk yağı ve n-bütanolün teorik H/Y oranları sırasıyla 12,4/1 ve 11,13/1'dir. Euro dizel yakıtının teorik H/Y oranı 14,9/1 olduğu düşünüldüğünde pamuk yağı ve n-bütanolün teorik tam yanma reaksiyonu için daha az havaya ihtiyaç olduğu anlaşılmaktadır.



Şekil 6.12: Üçlü karışım oranına bağlı CO emisyonu değişimleri

Şekil 6.12'deki yüzey grafiği incelendiğinde, üçlü karışım içerisindeki n-bütanol oranının %30'dan fazla olduğu tüm karışımlarda CO emisyon değerlerinde büyük bir düşüş açıkça görülmektedir. Bunun nedeni, n-bütanolün karışım içerisindeki oranının artmasının karışımın oksijen içeriğini artırıcı etki göstermektedir. Bu durum CO emisyon değerlerinde büyük bir azalmaya yol açtığı değerlendirilmektedir. Ayrıca, n-bütanolün viskozite ve kaynama noktası euro dizeler göre daha düşük olması nedeniyle buharlaşması daha kolaydır. Bu nedenle karışım içerisindeki n-bütanolün yanma odasındaki penetrasyonu daha kısa olacak ve hava ile daha kolay oksidasyona girerek CO emisyonu oluşumunu azaltıcı yönde etki gösterecektir [85,141].

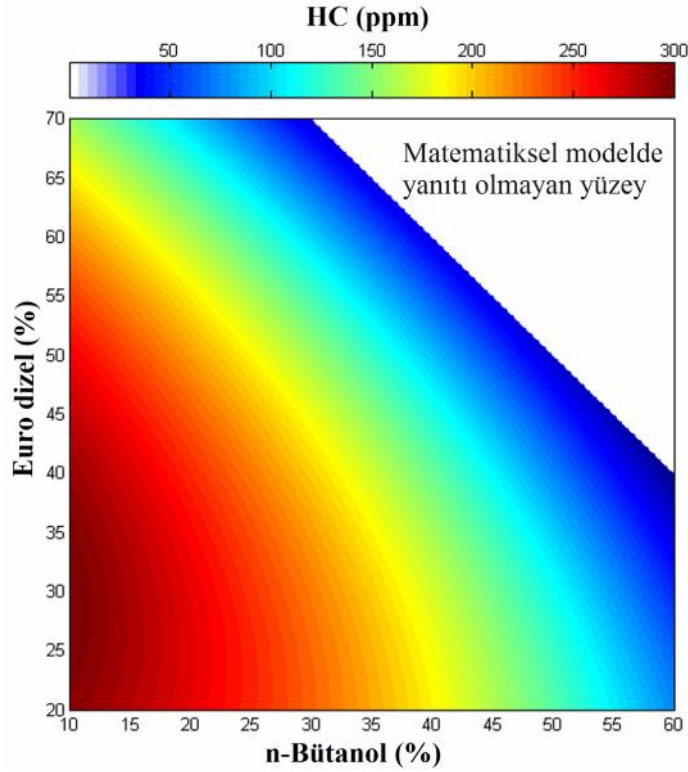
Grafikteki üçlü karışımlar arasında euro dizel karışım oranının %45'den ve n-bütanol karışım oranının %25'den daha az olduğu tüm karışımlarda CO emisyon değerlerinde büyük bir artış olduğu görülmektedir. Tarif edilen karışımlardaki pamuk yağı oranının yüksekliği bu karışımların viskozite ve yoğunluk değerlerinin çok artmasına yol açmaktadır. Bu artışın CO emisyonu değerlerinde büyük bir yükselişe neden olduğu değerlendirilmektedir. Yüksek viskozite ve yoğunluk enjektörden püskürtülen yakıt zerreciklerinin çapının büyük olmasına neden olur. Bu durum, yakıt zerreciklerinin oksijen ile oksidasyona uğrama süresini artırarak yanma veriminin düşmesine ve CO emisyonu oluşumunun artmasına neden olur.

6.6.2.5 HC Emisyonu

Üçlü karışımlardaki euro dizel ve n-bütanol karışım oranına bağlı olarak maksimum moment devrindeki HC emisyonu değişimleri Şekil 6.13'te gösterilmektedir. RSM ile kurulan matematiksel modelden elde edilen HC emisyonu çıktısı ile ölçülen deney çıktısı arasındaki doğrulama değeri olan R^2 %97,72 olarak bulunmuştur.

DnBP yakıtıyla elde edilen HC emisyonu değerinin euro dizel yakıtının HC emisyonu değerine göre %81,45 azaldığı tespit edilmiştir. Bu devirde euro dizelle elde edilen HC emisyonu değeri 275 ppm, DnBP ile elde edilen HC emisyonu değeri ise 51 ppm'dir. Bu iki yakıt arasındaki tüm devirlerin HC emisyonu değişimlerinin ortalamasında ise %75,59'luk bir azalma tespit edilmiştir.

DnBP yakıtının içerisindeki oksijen moleküllerinin varlığı yanma odasında oksijence zengin bölgelerin artmasına neden olur. Oksijen miktarının artması, yanma hızını ve yanma sıcaklığını artırıcı etki gösterir. Efektif veriminin artması ise motor parçalarına olan ısı transferini azaltıcı yönde etki gösterir. Bu durumun, DnBP yakıtı ile elde edilen HC emisyon değerinin euro dizele göre azalmasına yol açtığı değerlendirilmektedir.



Şekil 6.13: Üçlü karışım oranına bağlı HC emisyonu değişimleri

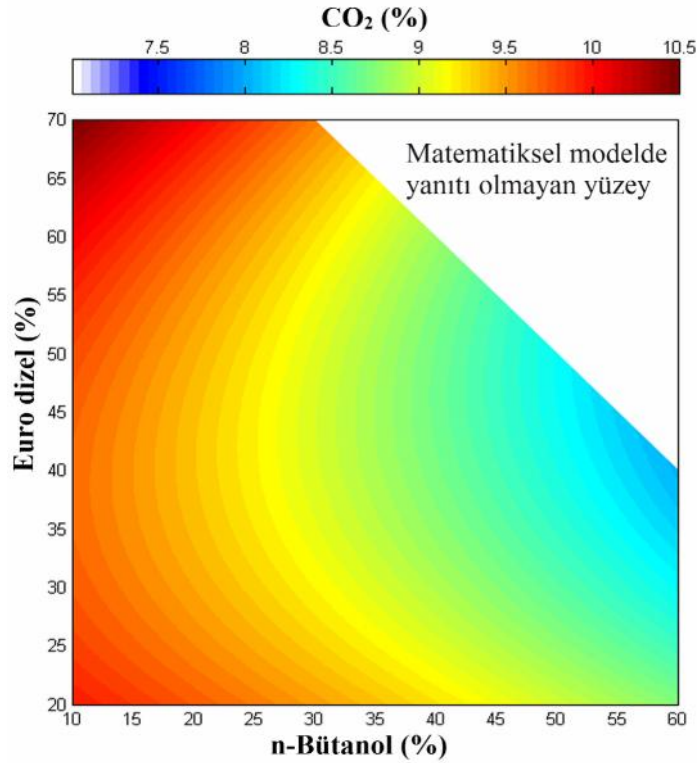
HC emisyonunun oluşumunun ana nedeni, sıcaklığın veya oksijenin yetersiz olması sonucunda (hava fazlalık katsayısı 1'den küçük-zengin karışım) yanmanın tamamlanamamasıdır. Bu durum, silindir içerisindeki soğuk cidarlara (silindir, silindir kafası ve piston üst yüzeyi) ısı kayıpları nedeniyle bu bölgeye ulaşan alevin aniden sönmeye başlamesi nedeniyle oluşmaktadır [109,141].

n-Bütanolün diğer iki bileşene göre, viskozite ve kaynama noktasının düşük olması nedeniyle fiziksel tutuşma gecikmesi daha kısa sürmektedir. Bu nedenle, kimyasal tutuşma gecikmesi gerçekleşmeden önceki yanma odasındaki penetrasyonu kısa olacaktır. Yanmanın başlamasıyla oluşan alev cephesi soğuk cidarlara ulaşmayacağı ve ısı kayıplarının meydana gelmeyeceği değerlendirilmektedir. Bu etkinin HC emisyonlarını azaltmada önemli bir rol oynadığı düşünülmektedir.

Şekil 6.13'teki yüzey grafiği incelendiğinde, euro dizel karışım oranının %45'den ve n-bütanol karışım oranının %20'den daha az olduğu tüm karışımlarda HC emisyon değerlerinde büyük bir artış olduğu görülmektedir. Grafiğin bu bölgesinde yer alan tüm karışımlardaki pamuk yağı oranının yüksekliği karışımların viskozite ve yoğunluk değerlerinin çok artmasına yol açmaktadır. Üçlü karışım içindeki pamuk yağı karışım oranının %35'in üstündeki alanlarda, Şekil 6.7'deki efektif verim grafiğinde görüldüğü gibi yanma veriminin düşmesine bağlı olarak HC emisyonlarında artış gözlenmektedir. Bunun aksine karışım içindeki n-bütanol oranının %35'den daha fazla olduğu alanlarda HC emisyonunda önemli derecede düşüş olduğu görülmektedir.

6.6.2.6 CO₂ Emisyonu

Üçlü karışımlardaki euro dizel ve n-bütanol karışım oranına bağlı olarak maksimum moment devrindeki CO₂ emisyonu değişimleri Şekil 6.14'te gösterilmektedir. RSM ile kurulan matematiksel modelden elde edilen CO₂ emisyonu çıktısı ile ölçülen deney çıktısı arasındaki doğrulama değeri olan R² %99,08 olarak bulunmuştur.



Şekil 6.14: Üçlü karışım oranına bağlı CO₂ emisyonu değişimleri

DnBP yakıtıyla elde edilen CO₂ emisyonu değerinin euro dizel yakıtının CO₂ emisyonu değerine göre %11,38 azaldığı tespit edilmiştir. Bu devirde euro dizelle elde edilen CO₂ emisyonu değeri %9,93, DnBP ile elde edilen CO₂ emisyonu değeri ise %8,8'dir. Bu iki yakıt arasındaki tüm devirlerin CO₂ emisyonu değeri değişimlerinin ortlamasında ise %6,35'lik bir azalma tespit edilmiştir.

Yanma odasındaki karbon atomları yeterli miktarda oksijen ile oksidasyona uğrayarak tam yanma ürünü olan CO₂'yi oluşturur. Yanma odasındaki oksijen konsantrasyonunun artması tam yanma reaksiyonunu destekleyerek CO₂ emisyonunun artmasına neden olur. DnBP yakıtını oluşturan bileşenlerden n-bütanolün diğer iki bileşene göre yüksek gizli buharlaşma ısısı yanma odasındaki sıcaklığın düşmesine yol açar. Sıcaklığın düşmesi, karbon atomlarının oksijen ile oksidasyon reaksiyonunu azaltıcı yönde etki gösterir. Diğer taraftan, CO₂ oluşumu yakıtların C/H oranına da bağlıdır. Yakıt içeriğindeki kütsel C atomlarının artması egzoz gazı içerisindeki CO₂ oranının artmasına neden olur [99]. Euro dizelin (C₁₄H₂₈) ve DnBP yakıtını oluşturan bileşenlerin kimyasal formülleri kullanılarak hesaplanan karbon içerikleri sırasıyla %85,71 ve %80,71'dir [24,72,74]. Bu nedenle, DnBP yakıtı ile elde edilen CO₂ emisyon değerinin n-bütanol karışım oranına ve karbon içeriğine bağlı olarak euro dizele göre daha düşük olduğu değerlendirilmektedir.

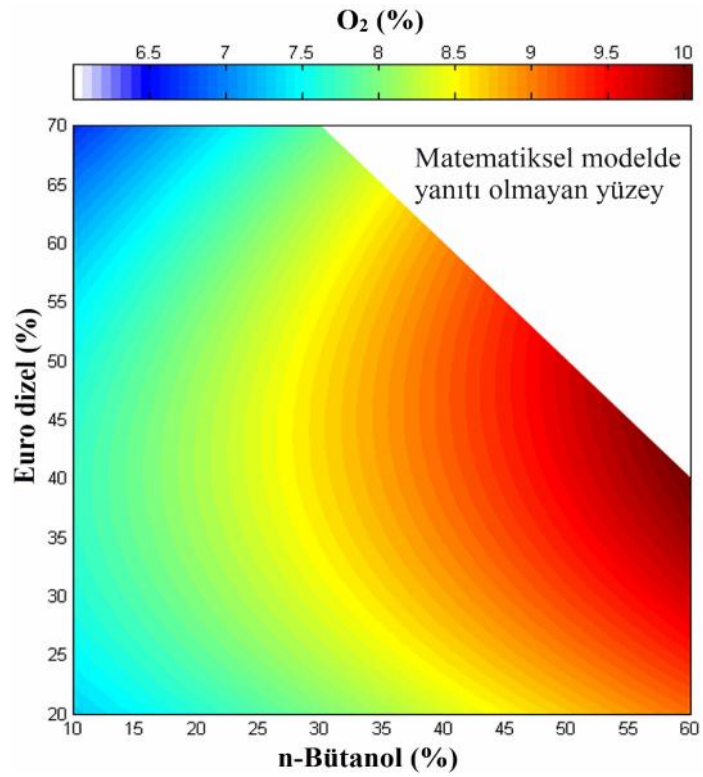
Şekil 6.14'teki yüzey grafiği incelendiğinde, üçlü karışım içerisindeki euro dizel oranı %60'ın üstünde ve n-bütanol oranının %20'nin altında olduğu tüm karışımlarda CO₂ emisyon değerlerinde artış görülmektedir. Bunun nedeni, bu bölgede yer alan karışımlardaki artan euro dizel oranına bağlı olarak kütsel karbon miktarının artmasıdır. Grafikteki üçlü karışım içerisindeki euro dizel oranının %50'den az ve n-bütanol oranının %25'den daha fazla olduğu tüm karışımlarda CO₂ emisyon değerlerinde azalma olduğu görülmektedir. Bu azalmanın, bu bölgedeki karışımlardaki artan n-bütanol oranına bağlı olarak, karışımın kütsel karbon içeriğinin azalması ve gizli buharlaşma ısısının artmasına bağlı olduğu değerlendirilmektedir.

Yanma odasındaki CO₂ oluşum miktarının artması egzoz gazları içerisindeki O₂ konsantrasyonunun azalmasına neden olur. Şekil 6.14 ve Şekil 6.15'deki yüzey

grafikleri incelendiğinde CO₂ emisyon değerlerinin azaldığı karışım oranlarında O₂ emisyon değerlerinde artış olduğu açıkça görülmektedir.

6.6.2.7 O₂ Emisyonu

Üçlü karışımlardaki euro dizel ve n-bütanol karışım oranına bağlı olarak maksimum moment devrindeki O₂ emisyonu değişimleri Şekil 6.15'te gösterilmektedir. RSM ile kurulan matematiksel modelden elde edilen O₂ emisyonu çıktısı ile ölçülen deney çıktısı arasındaki doğrulama değeri olan R² %99,14 olarak bulunmuştur.



Şekil 6.15: Üçlü karışım oranına bağlı O₂ emisyonu değişimleri

DnBP yakıtıyla elde edilen O₂ emisyonu değerinin euro dizel yakıtının O₂ emisyonu değerine göre %6,61 artış gösterdiği tespit edilmiştir. Bu devirde euro dizelle elde edilen O₂ emisyonu değeri %7,41, DnBP ile elde edilen O₂ emisyonu değeri ise %7,9'dur. Bu iki yakıt arasındaki tüm devirlerin O₂ emisyonu değerleri değişimlerinin ortlamasında ise %14,53'lük bir artış tespit edilmiştir.

Dizel motorlarda yanma reaksiyonu hava fazlalığı ile gerçekleşmektedir. Euro dizel yakıtının kimyasal yapısındaki C atomları, havanın içerisindeki yaklaşık %21

oranındaki O₂ ile oksidasyona uğrayarak yanma reaksiyonunu oluşturmaktadır. Yanma odasındaki O₂ konsantrasyonu motorun hacimsel veriminin (ara soğutucu, turboşarj ve süperşarj) artmasına paralel olarak artış gösterir. Yanma odasındaki O₂ konsantrasyonunun artmasının bir diğer yolu da kimyasal yapısında O₂ bulunan bitkisel yağ ve alkol gibi alternatif yakıtların dizel motorlarda kullanılmasıdır. DnBP yakıtının hesaplanan kütleli O₂ konsantrasyonu ise %6,02'dir. Bu nedenle, DnBP yakıtı ile elde edilen O₂ emisyon değeri euro dizele göre artış gösterdiği değerlendirilmektedir.

Şekil 6.15'teki yüzey grafiği incelendiğinde, üçlü karışım içerisindeki euro dizel oranı %65'in altında ve n-bütanol oranının %30'un üstünde olduğu tüm karışımlarda O₂ emisyon değerlerinde artış görülmektedir. Bunun nedeni, bu bölgede yer alan karışımlardaki artan n-bütanol ve pamuk yağı oranına bağlı olarak kütleli O₂ içeriğinin artmasıdır.

Grafikteki üçlü karışım içerisindeki euro dizel oranının %65'den fazla ve n-bütanol oranının %15'den daha az olduğu tüm karışımlarda O₂ emisyon değerlerinde azalma olduğu görülmektedir. Bu azalmanın, bu bölgedeki karışımlardaki azalan n-bütanol ve pamuk yağı oranına bağlı olarak, karışımın kütleli O₂ içeriğinin azalmasına bağlı olduğu değerlendirilmektedir.

7. BELİRSİZLİK ANALİZİ

Bilimsel çalışmalar analitik ve deneysel çalışmayı kapsayacak şekilde yürütülmektedir. Son yıllarda daha ucuz ve kolay olması nedeniyle istatistiksel yöntemlerle yapılan çalışmalar ağırlık kazanmasına rağmen, bu çalışmalardan elde edilen sonuçların deneysel olarak desteklenmesi, deneysel çalışmaların önemini ayrıca artırmaktadır. Bununla birlikte deneysel çalışmalarda, elde edilen sonuçlar kadar önemli bir başka nokta da ölçülen değerlerin doğruluğudur. Doğruluğu etkileyen en önemli etken ise, deneyler esnasında farklı nedenlerden ortaya çıkabilecek hatalar olarak gösterilmektedir [109,170,171].

Hata ise nominal değer ile gerçek değer arasındaki fark olarak tanımlanmaktadır. Hatalar kaba, sistematik ve rastgele hatalar olmak üzere üç çeşittir. Kaba hatalar, ölçüm cihazının veya teçhizatın yanlış kullanımı, usuller ve teknik bilgi hataları, basit ve bilerek yapılan hatalardır. Sistematik hatalar, cihaz veya teçhizat ile çevreye bağlı hatalar ile teçhizattaki arızalı ve aşınmış malzemelere bağlı olarak oluşan hatalardır. Rastgele hatalar ise ölçme performansını etkileyen birçok faktörün rastgele ortaya çıkması sonucunda oluşan hatalardır. Bu tip hatalar genellikle belli olmaması nedeniyle literatürde belirsizlik olarak adlandırılmaktadır. Deneylerde kullanılan ölçü aletinin imalatının doğru yapıldığı kabul edilirse, belirsizlik analizi, sistematik ve rastgele hataları belirleyerek bunların deneysel sonuçlar üzerindeki etkilerinin ortaya konulması olarak tanımlanmaktadır [109].

Belirsizlik analizi sadece sonuçların yorumlanmasında değil, aynı zamanda uygun ölçüm metodunun ve ölçü aracının seçiminde de önemli rol oynamaktadır. Deneysel belirsizlikler ve hatalar, sistemde kullanılan cihaz ve ölçüm aletlerinin seçiminden, çalışma durumundan, işlem koşullarından, kalibrasyonundan, çevre koşullarından ve okumalardan dolayı ortaya çıkmaktadır. Bu hata ve belirsizliklerin belirlenmesinde “Belirsizlik Analizi” kullanılmaktadır ve hem deneysel sonuçların yorumlanmasına, hem de sistem kurulumu öncesindeki tasarım çalışmalarında uygulanması gerekmektedir [109].

Deneyisel bulguların hata analizi için kullanılan belirsizlik analizi yöntemine göre, sistemde ölçülmesi gereken büyüklük R, ve bu büyüklüğe etki eden n adet bağımsız değişkenler ise $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ olarak belirlenmiştir.

Bu durumda, $R=R(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$ yazılabilir. Her bir bağımsız değişkene ait hata oranları $w_1, w_2, w_3, \dots, w_n$ ve R büyüklüğünün hata oranı w_R ise, bu durumda denklem (7.1) eşitliğindeki gibidir [171,172].

$$w_R = \left[\left(\frac{\partial R}{\partial x_1} w_1 \right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial x_2} w_2 \right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial R}{\partial x_n} w_n \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (7.1)$$

Motor test cihazı ile ölçülen ve hesaplama yöntemiyle elde edilen motor performans parametrelerinin belirlenmesinde kullanılan ölçü aletlerinin belirsizlik değerleri Tablo 7.1’de gösterilmektedir.

Tablo 7.1: Ölçü aletlerinin belirsizlik değerleri

Ölçülen büyüklük	Birim	Ölçü aleti	Belirsizlik değerleri
Kuvvet	kg	Yük hücresi	%0,03
Devir	d/dk.	Dijital takometre	%0,5
Kütlesel yakıt tüketimi	g/h	Yakıt ölçer	%1

Ölçü aletlerinin belirsizliklerine göre euro dizel yakıtının maksimum moment devri olan 2200 d/dk.’daki moment, efektif güç, özgül yakıt tüketimi, efektif verim ve ortalama efektif basınç değerlerinin belirsizlikleri (7.1) eşitliği kullanılarak hesaplanmıştır. Hesaplanan büyüklüklerin belirsizlik değerleri ve yüzdeleri Tablo 7.2’de gösterilmiştir.

Tablo 7.2: Hesaplanan büyüklüklerin belirsizlik değerleri

Hesaplanan büyüklük	Nominal değer	Belirsizlik değeri	Belirsizlik yüzdesi
Moment (Nm)	234,4	1,242	%0,53
Efektif güç (kW)	57,10	0,268	%0,47
Özgül yakıt tüketimi (g/kWh)	193,35	1,935	%1
Efektif verim (%)	0,43	0,477	%1,11
Ortalama efektif basınç (bar)	12,5	0,062	%0,50

8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Dünya enerji tüketimi giderek artış göstermektedir. Dünyanın belirli bölgelerinde üretilen petrol sınırlı rezervlere sahiptir. Nüfus artış ve enerji tüketim oranları dikkate alındığında, gelecekte enerji arzının tüketim miktarını karşılayamayacağı ve mevcut fosil kaynaklara dayalı enerji üretiminin yetersiz kalacağı değerlendirilebilir. Petrol fiyatlarındaki ani yükseliş, kaynağının sınırlı olması, özellikle sera gazı ile ilgili çevresel etkilerin insan ve diğer canlıların sağlığına önemli derecede zarar verici seviyeye ulaşması, sağlık ve güvenlik konuları göz önüne alındığında uluslararası platformda yapılan bazı protokoller ve düzenlemeler gereği yeni ve yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelmek gerekmektedir. Özellikle Kyoto protokolü ile belirlenen emisyon değerlerini sağlama zorunluluğu ve Avrupa Birliğinin fosil kökenli yakıtların kullanım oranının azaltılmasına yönelik hedeflerinin olması bu gerekliliği desteklemektedir.

2010 yılında atmosfere salınan CO₂ gazının %43'ü kömür, %36'sı petrol ve %20'si de doğal gaz kaynaklıdır [13]. 2011 yılında dünya enerji tüketimindeki en büyük pay ise %33 ile petrole aittir [2,3]. Bu noktada, petrolün en fazla kullanıldığı ulaştırma sektöründeki yakıt ihtiyacının sürdürülebilir, ekonomik ve çevreye dost olacak alternatif yakıt kaynaklarından karşılanması CO₂ ve diğer sera gazı emisyonlarının azaltılmasının en etkili yolu olarak görülmelidir.

Dünya genelindeki ulaşım sektöründe motorlu taşıt sayısı büyük bir artış göstermektedir. Bu artış içinde en büyük payı da dizel motorlu araçlar almaktadır. Dizel motorlar için sürdürülebilir enerji kaynağı olan biyoyakıtlar sera gazı emisyonunu önemli ölçüde azaltılması, hava kalitesinin artırılması, petrol ithalatında daha az bağımlılık, istihdam ve yeni pazarlar için önemli bir alternatif enerji kaynağıdır. Biyokütle potansiyeli yüksek olan ülkelerde biyoyakıt olarak bitkisel yağlar ve biyoalkoller ön plana çıkmaktadır. Doğrudan gıda amaçlı olarak kullanılmayan bitkisel yağların ve dizel motor çalışma şartlarına uygun yakıt özelliklerine sahip alkollerin dizel motorlarda alternatif bir yakıt olarak kullanılması bu noktada önem kazanmaktadır.

Bitkisel yağlardan alternatif dizel yakıtı üretilmesinde yaygın olarak kullanılan transesterifikasyon yöntemiyle üretilen biyodizel yakıtının üretim maliyetinin yüksek olması, üretimde açığa çıkan gliserini değerli bir ürün haline getirmek için ilave enerjinin harcanması, 0 °C'nin altındaki düşük sıcaklıklarda soğuk akış özelliklerinin olumsuzluk yaratması ve NO_x emisyonunun dizel yakıtına göre artış göstermesi biyodizelin üretiminde ve kullanımındaki olumsuzluklardır. Bu durum bitkisel yağlardan üretilen biyodizelin dizel motorlarda yüksek karışım oranlarında kullanılmasını sınırlandırmaktadır [16,21,25,32-34]. Bitkisel yağların viskozitesini azaltma yöntemlerinden olan mikroemülsiyon yöntemi belirtilen nedenlerden dolayı transesterifikasyon yöntemine göre avantajlı durumdadır. Böylece mikroemülsiyon yöntemi kullanılarak bitkisel yağlardan alternatif dizel yakıtı tasarlanabilmektedir.

Türkiye'nin de üyesi olmayı hedeflediği Avrupa Birliği'nde 2020 yılına kadar ulaştırma sektöründeki biyoyakıt kullanım oranının %10'a ulaşması hedeflenmiştir [17,37]. Ayrıca, Türkiye ile benzer iklime sahip olan Yunanistan'nın tarımsal ekonomisinde büyük bir paya sahip olan pamuk yağı, Avrupa 2003/30/EC yakıt ve emisyon standartlarına göre dizel motorlar için alternatif bir enerji kaynağı olarak gösterilmektedir [53,71]. Bu noktada, fosil kökenli yakıtta ithalata bağımlı olan Türkiye'de iklim koşulları, ekili alanları ve doğrudan gıda amaçlı kullanılmaması gibi faktörler dikkate alındığında üretilen pamuk yağının dizel motorlarda alternatif yakıt olarak öne çıkabileceği değerlendirilmektedir.

Dizel motorlarında kullanılan diğer bir alternatif yakıt olan alkoller dizel yakıtı ile karışım oluşturma şeklinde kullanılmaktadır. Dizel motorlarda alternatif yakıt olarak alkollerin kullanıldığı araştırmalarda üretim miktarından dolayı etanol ön plana çıkmaktadır. Ancak, etanolün dizel motorlarda dizel yakıtı ile karışım oluşturma şeklinde kullanılmasında 10 °C'nin altındaki sıcaklıklarda faz ayrışması gerçekleşmektedir. Bu ayrışmayı engellemek ve homojen bir karışım oluşturmak için hem etanol ile hem de dizel yakıtı ile çözünebilen ortak çözücü kullanılması gerekmektedir [38-41]. Bu durumda ilave maliyetin ortaya çıkmasına neden olmaktadır. Ayrıca, etanolün yakıt özelliklerinin dizel motor çalışma şartlarına çok uygun olmaması dizel motorlarında kullanılmasını sınırlandırmaktadır.

Son yıllarda alkollerin dizel motorlarda alternatif yakıt olarak kullanılması ile ilgili sınırlı sayıda yapılan çalışmalarda etanole göre daha üstün yakıt özelliklerine sahip olan alkol çeşidi olarak n-bütanol ön plana çıkmaktadır ve bu çalışmalarda dizel motorlarda n-bütanol kullanılması ile ilgili araştırmaların yapılması tavsiye edilmektedir [35,37,41]. Özellikle sürdürülebilir enerji probleminin çözümünde yeni nesil biyoyakıt olan n-bütanolün dünya biyoyakıt üretiminde en büyük iki şirket olan BP ve DuPont ortaklığında üretiminin yapılması ve Amerikan çevre koruma örgütü (EPA) tarafından n-bütanol kullanımı ile ilgili yapılan düzenlemeler bütanolün dizel motorlar için önemini ortaya koymaktadır. Dizel yakıtı ile karışım oluşturarak kullanılan alkoller arasında n-bütanol, yakıt özellikleri ve dizel yakıtı ile her oranda karışabilmesi bakımından etanole göre tercih edilecek bir alkol çeşididir. n-Bütanol ve etanol aynı üretim prosesinin farklı aşamalarından elde edilebilmektedir.

Dizel yakıtına alternatif olabilecek yakıtlar teknik, ekonomik ve çevresel yönden kabul edilmeli ve hammadde temini kolay olmalıdır [15,16]. Sıralanan bu kriterlere göre bitkisel yağların gıda amaçlı olarak yaygın tüketilemeyen veya yenmeyen nitelikte olması önem kazanmaktadır. Transesterifikasyon yöntemi yerine mikroemülsiyon yönteminin kullanılması durumunda; bu özelliklere sahip bir bitkisel yağ ile dizel yakıtı karışımlarında, karışımın kararlılığını sağlamak için üçüncü bileşen olarak biyokütleden üretilebilen ve ortak çözücü özelliğine sahip alkolün kullanılmasıyla, dizel yakıtı ile bitkisel yağ karışımlarının düşük sıcaklıklarda gösterdiği faz ayrışması gibi olumsuz özellikleri giderilebilecektir. Ayrıca, biyodizel üretilmesine gerek duyulmadan biyodizelin üretim maliyetinden ve yakıt olarak kullanımındaki soğuk akış özelliklerinden kaynaklanan sorunlar da ortadan kaldırılabilir.

Mikroemülsiyon yöntemiyle nötr pamuk yağı ile euro dizel yakıtı çözeltilerinde ortak çözücü olarak n-bütanolün kullanılması ile soğuk iklim şartlarında faz ayrışması gerçekleştirmeyecek ve motor performansı ile egzoz emisyon değerlerinin kabul edilebilir seviyede olduğu alternatif bir üçlü yakıt karışımının tasarlanmasının amaçlandığı bu tez çalışması kapsamında;

Euro dizel yakıtı, n-bütanol ve nötr pamuk yağı üçlü karışımlarının soğuk akış özellikleri dikkate alınarak bileşenlerin farklı sıcaklıklarda birbirleri ile olan çözünürlük ilişkilerini göstermek amacıyla üçlü karışım faz diyagramları çizilmiştir.

En düşük sıcaklıktaki faz diyagramının faz ayrışmasının gerçekleşmediği alanındaki konsantrasyonlar arasından deneysel çalışmalarda yapılacak deney sayısını ve deneyin maliyetini azaltıcı istatistiksel bir metod olan deney tasarımı kullanılarak seçilen 7 farklı üçlü karışıma ait motor performansı ve egzoz emisyon deneyleri yapılmıştır.

Yapılan deneyler sonucunda deney motorunun maksimum moment devrinde elde edilen motor performansı ve egzoz emisyon çıktı parametreleri dikkate alınarak en ideal üçlü karışım içerisindeki bileşen konsantrasyonlarının belirlenmesi için RSM kullanılarak optimizasyon yapılmıştır. Optimizasyon sonucunda bir yakıt karışımı tasarlanmış ve bu karışım DnBP olarak adlandırılmıştır. RSM ile yapılan optimizasyon sonucunda DnBP yakıtına ait motor performansı ve egzoz emisyon çıktıları ile gerçek deney sonuçlarını karşılaştırmak için deney yakıtı hazırlanarak doğrulama deneyleri yapılmıştır. DnBP yakıtının yakıt özellikleri incelenmiştir. DnBP yakıtının euro dizele göre, motor performansı ve egzoz emisyon değerleri karşılaştırılarak üstünlük ve zayıf yönleri de ele alınmıştır.

8.1 Sonuçlar

Tez çalışmasının her aşamasından elde edilen sonuçlar aşağıda belirtilmiştir;

* Yakıt bileşenlerinin birbirleriyle olan çözünürlük ilişkisinin belirlenmesi için yapılan titrasyon işleminde ve yakıt karışımlarının alt ısıl değerlerinin hesaplanmasında kullanılması maksadıyla ölçülen yoğunlukların literatürde yer alan değerlere yakın olduğu tespit edilmiştir.

* Yakıt bileşenlerinden nötr pamuk yağının, ölçülen % yağ asit kompozisyon değerlerinin %73'ü linoleik ve oleik başta olmak üzere tekli doymamış yağ asitlerinden oluştuğu ve en önemli doymuş yağ asidinin ise %23,13 ile oranındaki palmitik asit olduğu tespit edilmiştir. Artan doymamışlık derecesine bağlı olarak düşen setan sayısına rağmen tek çift bağlı olan oleik yağ asitlerini içeren yağlar

uygun dizel yakıtı alternatifi olarak görülmektedir [23,106,115]. Buna göre, nötr pamuk yağının yakıt özellikleri iyileştirilerek dizel motorlarda kullanılabilceği tespit edilmiştir.

* Mikroemülsiyon sistemi olarak tasarlanan, euro dizel, n-bütanol ve pamuk yağı üçlü sisteminde sabit basınçta, oda sıcaklığı (24 °C), 5 °C, 0 °C, -5 °C ve -10 °C sıcaklıklardaki en dayanıklı ve kararlı mikroemülsiyonu verdiği konsantrasyonlar titrasyon ile belirlenmiş ve üçlü karışım faz diyagramları çizilmiştir. Bu diyagramların eksenleri sıcaklık ve karışım oranına göre incelenmiştir.

* Euro dizel yakıtı ile pamuk yağı karışımlarında pamuk yağı karışım yüzdesinin artmasına paralel olarak pamuk yağına doymuş euro dizel bölgesinde sıcaklık düşüğe çözünürlük bakımından azalma gerçekleşmiştir. Bu azalma pamuk yağının viskozitesinin, bulutlanma, akma ve soğukta filtre tıkanma noktasının euro dizel yakıtına göre yüksek olmasından kaynaklanmıştır [99]. -10 °C'de tek fazlı bir euro dizel ile pamuk yağı ikili karışımı elde etmek için minimum %95 oranında dizel yakıtının karışıma dâhil edilmesi gerektiği belirlenmiştir. Bu durumun euro dizel yakıtı ile pamuk yağı karışımlarının düşük sıcaklıklardaki kullanımını sınırlandıracağı tespit edilmiştir.

* Pamuk yağı ile n-bütanol karışımları, euro dizel ile pamuk yağı karışımlarına göre biraz daha iyi çözünürlük özelliği sergilemiştir. Ancak sıcaklık düşüğe bu iki bileşenin çözünürlüğü azalmıştır. Bu durum pamuk yağının soğuk akış özelliklerini belirten sıcaklıklarının n-bütanole göre yüksek olmasından kaynaklanmıştır. Karışım içindeki n-bütanol oranı arttıkça çözünürlük artmıştır ancak n-bütanolün ısıl değerinin pamuk yağına göre düşük olması ikili karışımlarda ki n-bütanol oranının düşük değerde kalmasına neden olacağı tespit edilmiştir.

* n-Bütanol ile euro dizel karışımlarında çözünürlük yönünden literatürle paralel sonuçlar elde edilmiştir [34-37]. n-Bütanol euro dizel içinde herhangi bir çözücü madde kullanmaksızın her oranda çok iyi bir çözünme sağlamıştır [33-39]. n-bütanol ile euro dizel yakıtı karışımlarında herhangi bir faz ayrışması problemi olmamıştır. Ancak n-bütanolün ısıl değerinin ve setan sayısının euro dizele göre düşük olması nedeniyle ikili karışımlarda n-bütanol oranının artırılmasını sınırlandıracağı tespit edilmiştir.

* Üçlü karışım diyagramının iç kısmı üç bileşenin karışım oranını göstermektedir. Euro dizel, n-bütanol ve pamuk yağı üçlü karışımlarının tamamen çözüldüğü üçgenin iç kısmındaki çözünür alandaki karışımlarda faz ayrışması gerçekleşmemiştir. Buna göre, üçlü karışım bileşenlerinin soğuk akış özellikleri dikkate alınmış ve sıcaklık bakımından en kötü koşul olarak belirlenen -10 °C'deki faz diyagramındaki çözünür alanın, yakıt karışımı kararlılığı, soğuk iklim koşullarında dayanıklılığı bakımından diğer sıcaklıklara göre daha iyi performans sergileyeceği tespit edilmiştir.

* -10 °C'deki üçlü karışım faz diyagramındaki çözünür alandan RSM ile yapılan deney tasarımında seçilen 7 farklı konsantrasyonun deney motorunun maksimum moment devrindeki motor performans ve egzoz emisyon parametrelerine göre kurulan matematiksel modelin R² doğruluk değerlerinin güven aralığı içinde yer aldığı tespit edilmiştir. Buna göre, optimizasyona dâhil edilen moment, efektif güç, özgül yakıt tüketimi, efektif verim ve ortalama efektif basınç ile NO_x, CO ve HC emisyon parametrelerinin hedeflenen değerlerini istenilen oranda sağlayan %65,5 euro dizel (D), %23,1 n-bütanol (nB) ve %11,4 pamuk yağı (P) oranında optimum yakıt karışımı (DnBP) bulunmuştur.

* Matematiksel model ile elde edilen R² değerlerine göre optimizasyona dâhil edilen parametrelerin optimizasyon sonuçları ile doğrulama deneyi sonuçlarının birbirini tüm parametreler için tam olarak karşıladığı tespit edilmiştir. Bu durum deney tasarımının ve kurulan matematiksel modelin doğruluğunu, yapılan optimizasyonun ise geçerliliğini göstermiştir.

* DnBP yakıtının yoğunluk ve kinematik viskozite değerleri dizel motor donanımları (yakıt pompası, enjektörler) ve çalışma şartlarına (püskürtme karakteristikleri) göre değerlendirildiğinde, euro dizel yakıtına yakın değerlerde olduğu tespit edilmiştir.

* DnBP yakıtının setan sayısı EN ve ASTM standartlarında belirtilen sınır değerinin üzerindedir. Ancak euro dizel yakıtına göre, setan sayısının %17,47, ısıl değerinin ise %6,04 düşük olduğu tespit edilmiştir.

* DnBP yakıtının bulutlanma noktası, akma noktası ve soğukta filtre tıkanma noktası gibi soğuk akış özellikleri bakımından çok iyi seviyede olduğu tespit edilmiştir. Bu durum, DnBP yakıtının düşük sıcaklıklardaki faz kararlılığının bozulmayacağını göstermiştir.

* DnBP yakıtının taşınmasında yüksek parlama noktası nedeniyle ilave bir tedbir almaya gerek olmayacağı ve uzun süre depolanmasında belirleyici bir özellik olan oksidasyon kararlılığının da çok iyi seviyede olduğu tespit edilmiştir.

* DnBP yakıtının metaller üzerine olan korozyon etkisinin de standart değer içerisinde yer aldığı ve tüm bu özelliklerdeki DnBP yakıtının dizel motorlar için alternatif bir yakıt olabileceği tespit edilmiştir.

DnBP yakıtının doğrulama deneyinden elde edilen motor performans deneyi sonuçlarına göre;

* DnBP yakıtıyla elde edilen moment ve efektif güç değeri euro dizel yakıtının moment ve efektif güç değerine göre sırasıyla %6,02 ve %5,08 azalmıştır. DnBP yakıtının euro dizel yakıtına göre, karışım bileşenlerinden n-bütanol ve pamuk yağının kimyasal yapılarındaki oksijen moleküllerinin varlığı nedeniyle ısı değerinin %6,04 düşük olması, yüksek kinematik viskozitesi nedeniyle tutuşma gecikmesinin uzamasıyla yanmanın kötüleşmesi ve n-bütanolün diğer bileşenlere göre yüksek olan gizli buharlaşma ısısı nedeniyle yanma sıcaklığının düşmesi momentte ve efektif güç değerlerinde azalmaya neden olduğu tespit edilmiştir.

* DnBP yakıtıyla elde edilen özgül yakıt tüketimi değeri euro dizel yakıtının özgül yakıt tüketimi değerine göre %24,53 artış göstermiştir. Maksimum moment devrinde, yanma odasına hacimsel olarak püskürtülen euro dizel ve DnBP yakıt miktarlarının aynı olması durumunda, açığa çıkacak enerji miktarı euro dizel yakıtı için daha fazla olacaktır. Bu nedenle motordan aynı efektif gücü alabilmek için kütleli olarak daha fazla DnBP yakıtı kullanılması gerekmektedir. Bu durumun, DnBP yakıtının euro dizel yakıtına göre ısı değerinin %6,04 düşük olmasına bağlı olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca, setan sayısının euro dizele göre %17,47 düşük olması, tutuşma gecikmesi süresinin uzamasına ve efektif güce dönüşebilecek faydalı

enerjinin azalmasına yol açmaktadır. Bu etkiler DnBP yakıtının özgül yakıt tüketim değerinin artış göstermesine neden olmuştur.

* DnBP yakıtıyla elde edilen efektif verim değeri euro dizel yakıtının efektif güç değerine göre %13,82 azalmıştır. DnBP yakıtının euro dizele göre ısı değerinin ve setan sayısının düşüklüğü, viskozite değerinin yüksek olması yanma sonunda açığa çıkan enerjinin azalmasına ve faydalı işe dönüşüm oranının düşmesine neden olmaktadır. Bu durum DnBP yakıtı ile elde edilen efektif verim değerinin euro dizel yakıtına göre düşmesine neden olmuştur. Yakıtın faydalı işe dönüşüm oranının bir göstergesi olan efektif verimi etkileyen en önemli motor performans parametresi özgül yakıt tüketimidir. Özgül yakıt ve efektif verim yüzey grafiklerinde özgül yakıt tüketim değerlerinin arttığı bölgelerde efektif verim değerlerinde düşüş olduğu tespit edilmiştir.

* DnBP yakıtıyla elde edilen ortalama efektif basınç değeri euro dizel yakıtının ortalama efektif basınç değerine göre %5,12 azalmıştır. DnBP yakıtının euro dizele göre ısı değerinin az ve viskozite değerinin yüksek olması yanma sonunda açığa çıkan enerjinin ve krank milini çevirmek için piston üzerine çevrim boyunca etki eden basınçların ortalaması olarak tanımlanan ortalama efektif basıncın azalmasına neden olduğu tespit edilmiştir. Ortalama efektif basınç, efektif güç ve motor devrinin bir fonksiyonudur. Ortalama efektif basıncı belirleyen tek motor performans parametresi efektif güçtür. Ortalama efektif basınç yüzey grafikleri karşılaştırıldığında her iki grafikte de üçlü karışım içerisindeki euro dizel ve n-bütanol oranları ile elde edilen değişimlerin benzerlik gösterdiği tespit edilmiştir.

DnBP yakıtının doğrulama deneyinden elde edilen egzoz emisyon deneyi sonuçlarına göre;

* DnBP yakıtıyla elde edilen NO emisyonu değeri euro dizel yakıtının NO emisyonu değerine göre %11,98 azalmıştır. DnBP yakıtının euro dizel ile karşılaştırıldığında daha düşük setan sayısına sahip olması, dizel motorlarda yanmayı etkileyen en önemli parametre olan tutuşma gecikme süresini artırıcı yönde etki göstermektedir. Bu etkinin, yanma sonu sıcaklığı ve basıncını artırmasıyla NO emisyonu oluşumunu artırdığı değerlendirilmiştir. Ancak, DnBP yakıtının ısı değerinin euro dizele göre daha düşük olması yanma sonu sıcaklığını azaltıcı etki

göstermektedir. Ayrıca, üçlü karışımı oluşturan bileşenlerden en yüksek gizli buharlaşma ısısına sahip olan n-bütanolün alev sıcaklığını düşürerek yanma sonu sıcaklığını azalttığı değerlendirilmiştir. Bununla birlikte, DnBP yakıtı içerisinde pamuk yağının bulunması karışımın viskozitesini artırdığı, viskozitenin artmasının ise yanma verimini olumsuz yönde etkilediği ve böylece yanma sonu sıcaklığını düşürdüğü değerlendirilmiştir. DnBP yakıtının yakıt özelliklerine bağlı olarak yanma üzerindeki etkilerinin tamamı değerlendirildiğinde, NO emisyonunun azalmasında düşük ısı değer, yüksek gizli buharlaşma ısısı ve viskozitenin düşük setan sayısından daha etkin rol oynadığı tespit edilmiştir.

* DnBP yakıtıyla elde edilen NO₂ emisyonu değeri euro dizel yakıtının NO₂ emisyonu değerine göre %35,92 artış göstermiştir.

* Dizel motorlardan kaynaklanan egzoz emisyonları içerisinde azotun (N₂) sekiz farklı oksidasyonu bulunmaktadır. Bu oksidasyonların hacimsel olarak %90'ını NO, %5'ini NO₂ ve %5'ini nitrik oksitler (N₂O, N₂O₃, ve N₂O₅) oluşturmaktadır [32]. Bu oksidasyonların tamamı NO_x olarak adlandırılmaktadır. Şekil 6.9'daki NO emisyonu yüzey grafiği ile Şekil 6.11'deki NO_x emisyonu yüzey grafikleri incelenmiş ve her iki grafiğinde aynı eğilimde olduğu tespit edilmiştir. Buna göre, DnBP yakıtıyla elde edilen NO_x emisyonu değeri euro dizel yakıtının NO_x emisyonu değerine göre %11,33 azalmıştır.

* DnBP yakıtıyla elde edilen CO emisyonu değeri euro dizel yakıtının CO emisyonu değerine göre %45,17 azalmıştır. Yanma denklemleri (3.1) ve (3.2) kullanılarak hesaplanan pamuk yağı ve n-bütanolün teorik H/Y oranları sırasıyla 12,4/1 ve 11,13/1'dir. Euro dizel yakıtının teorik H/Y oranı 14,9/1 olduğu düşünüldüğünde pamuk yağı ve n-bütanolün teorik tam yanma reaksiyonu için daha az havaya ihtiyaç olduğu tespit edilmiştir. Bu duruma paralel olarak DnBP yakıtının hesaplanan kütleli O₂ konsantrasyonu %6,02 değerindedir. Buna göre, DnBP yakıtı ile elde edilen CO emisyonunun euro dizel göre azalmasının temel nedeni, yakıt bileşenlerinden pamuk yağı ve n-bütanolün içeriğindeki oksijen miktarıdır.

* DnBP yakıtıyla elde edilen HC emisyonu değeri euro dizel yakıtının HC emisyonu değerine göre %81,45 azalmıştır. DnBP yakıtının içerisindeki oksijen moleküllerinin varlığı yanma odasında oksijence zengin bölgelerin artmasına neden

olur. Oksijen miktarının artması, yanma hızını ve yanma sıcaklığını artırıcı etki gösterir. Efektif veriminin artması ise motor parçalarına olan ısı transferini azaltıcı yönde etki gösterir. Bu durumun, DnBP yakıtı ile elde edilen HC emisyon değerinin euro dizele göre azalmasına yol açtığı tespit edilmiştir.

* DnBP yakıtıyla elde edilen CO₂ emisyonu değeri euro dizel yakıtının CO₂ emisyonu değerine göre %11,38 azalmıştır. Yanma odasındaki oksijen konsantrasyonunun artması tam yanma reaksiyonunu destekleyerek CO₂ emisyonunun artmasına neden olur. Ancak, DnBP yakıtını oluşturan bileşenlerden n-bütanolün diğer iki bileşene göre yüksek gizli buharlaşma ısısı yanma odasındaki sıcaklığın düşmesine yol açar. Sıcaklığın düşmesi, karbon atomlarının oksijen ile oksidasyon reaksiyonunu azaltıcı yönde etki gösterir. Yakıt içeriğindeki kütsel C atomlarının artması egzoz gazı içerisindeki CO₂ oranının artmasına neden olur [99]. Euro dizel ve DnBP yakıtının hesaplanan karbon içerikleri sırasıyla %85,71 ve %80,71'dir. Bu nedenlerden dolayı, DnBP yakıtı ile elde edilen CO₂ emisyon değerinin n-bütanol karışım oranına ve yakıtın karbon içeriğine bağlı olarak euro dizele göre daha düşük olduğu tespit edilmiştir.

* DnBP yakıtıyla elde edilen O₂ emisyonu değeri euro dizel yakıtının O₂ emisyonu değerine göre %6,61 artış göstermiştir. DnBP yakıtının O₂ içeriğine sahip olması nedeniyle O₂ emisyonunun euro dizele göre artış gösterdiği tespit edilmiştir.

* Euro dizel yakıtıyla 2200 d/dk.'deki moment, efektif güç, özgül yakıt tüketimi, efektif verim ve ortalama efektif basınç değerleri için belirsizlik analizi yapılmış ve belirsizlik değerleri sırasıyla %0,53, %0,47, %1, %1,11 ve %0,50 olarak hesaplanmıştır.

* DnBP yakıtının yakıt özellikleri, Tablo 8.1'deki motor karakteristikleri ve içeriğindeki %34,5'lik (%23,1 n-bütanol + %11,4 pamuk yağı) yenilenebilir yakıt oranı dikkate alındığında, dizel yakıtına alternatif bir yakıt olabileceği değerlendirilmiştir.

Tablo 8.1: DnBP yakıtının motor karakteristikleri

Motor karakteristikleri	2200 d/dk.'daki ölçülen ve hesaplanan değerler		
	Euro dizel	DnBP	Fark
Moment (Nm)	234,4	220,3	-%6,02
Efektif güç (kW)	57,1	54,20	-%5,08
Özgül yakıt tüketimi (g/kWh)	193,34	240,77	%24,53
Efektif verim (%)	42,92	36,99	-%13,82
Ortalama efektif basınç (bar)	12,50	11,86	-%5,12
NO (ppm)	1018	896	-%11,98
NO ₂ (ppm)	14,20	19,30	%35,92
NO _x (ppm)	1032,20	915,30	-%11,33
CO (ppm)	580	318	-%45,17
HC (ppm)	275	51	-%81,45
CO ₂ (%)	9,93	8,8	-%11,38
O ₂ (%)	7,41	7,9	%6,61

8.2 Öneriler

* Türkiye'nin fosil yakıt kaynaklı enerji ihtiyacının azaltılması için yenilenebilir enerji kaynaklarına ve özellikle biyoyakıtlara yönelmesi petrolde dışa bağımlılığını ve artan enerji fiyatlarının baskısından kurtulmasına yardımcı olacaktır.

* Pamuk yağının Türkiye'nin kendi imkânları ile üretebildiği bir alternatif yakıt enerji kaynağı olarak görülmesi özellikle petrole bağımlılığı azaltacaktır.

* Pamuk yağının doğrudan gıda amaçlı kullanılmaması nedeniyle pamuk araştırma enstitülerinde yağlı tohum verimi ve üretim maliyetinin düşürülmesi üzerine araştırmaların yapılması pamuk yağı üretimini artıracaktır.

* Pamuk ekimine uygun fakat kullanılmayan tarım alanları yeniden faaliyete geçirilerek alternatif yakıt kaynağı için üretimin yapılması tarım sektörüne canlılık getirecek ve istihdam artışı sağlayacaktır.

* Bitkisel yağların viskozitesini azaltma yöntemlerinden biri olan mikroemülsiyon yönteminde kullanılan n-bütanolün yerli kaynaklar kullanılarak üretilmesiyle ithalat maliyetinin azaltılması sağlanacaktır.

* n-Bütanol benzin ve dizel yakıtı ile her oranda karışabilmektedir. Bu noktada, Türkiye’de etanol üretimi yapan tesislerin bütanol üretimine göre yatırım yapmasının teşvik edilmesi, Türkiye için çok önemli bir biyoyakıt kaynağı yaratacaktır.

* Yakıt olarak kullanmak maksadıyla, Türkiye’de pamuk yağı ile birlikte n-bütanol üretiminin yapılması, alternatif dizel yakıtı olarak DnBP yakıtının kullanılmasına katkı sağlayacaktır.

* Farklı motor tiplerinde (common-rail yakıt sistemine sahip, değişken tuboşarjlı) ve farklı motor çalışma şartlarında (enjeksiyon basıncı ve enjeksiyon zamanı) euro dizel, n-bütanol ve pamuk yağı optimum üçlü karışımın bulunması ile ilgili araştırmaların yapılması, dizel motorlarda alternatif yakıt kullanılmasına katkı sağlayacaktır.

* DnBP yakıtının euro dizele göre düşük değerde olan setan sayısının artırılması için setan artırıcı katkı maddeleri kullanılmasının motor performansına ve egzoz emisyonlarına etkileri incelenmelidir.

* DnBP yakıtının içeriğindeki alkol bileşeni nedeniyle yağlayıcılık özelliği incelenmelidir.

* DnBP yakıtının motor sistemlerine ve parçalarına etkilerinin daha verimli bir şekilde tespit edilebilmesi için sadece kısa süreli testler değil, uzun süreli testler de yapılmalıdır.

9. KAYNAKLAR

- [1] Demirbaş A., *Green energy and technology biofuels*, London: Springer Verlag, 1-4, (2009).
- [2] EIA, “*Annual energy outlook 2012 with projections to 2035*”, 17-63, (2012).
- [3] Dudley B., “*Statistical review world of energy, BP*”, 6-19, (2012).
- [4] EPDK, “*Enerji yatırımcısı el kitabı*”, 45-52, (2012).
- [5] PETDER, “*Petrol sektör raporu Ocak-Haziran*”, 3-6, (2012).
- [6] TPAO, “*Ham petrol ve doğal gaz sektör raporu*”, 2-6, (2011).
- [7] EPDK, “*Petrol piyasası sektör raporu*”, 1-11, (2012).
- [8] World Energy Council, “*Enerji raporu*”, 43-50, (2011).
- [9] IEA, “*Key world energy statistics*”, 6-11, (2012).
- [10] OPEC, “*World oil outlook*”, 25-62, (2012).
- [11] TÜİK, “*Motorlu kara taşıtları istatistikleri*”, 1-4, (2011).
- [12] T.C. Resmi Gazete, “*Milletlerarası sözleşme*”, Sayı, 27227, (2009).
- [13] IEA, “*CO₂ emission from fuel combustion*”, 37-39, (2012).
- [14] Sidibe, S.S., Blin, J., Vaitilingom, G. and Azoumah Y., “Use of crude filtered vegetable oil as a fuel in diesel engines state of the art: Literature review”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14, 2748-2759, (2010).
- [15] Ramadhas, A.S., Jayaraj, S. and C. Muraleedharan, “Use of vegetable oils as I.C. engine fuels-A review”, *Renewable Energy*, 29, 727-742, (2004).
- [16] Srivastava, A. and Prasad, R., “Triglycerides-based diesel fuels”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 4, 111-133, (2000).
- [17] Nigam, P. S. and Singh, A., “Production of liquid biofuels from renewable resources-Review”, *Progress in Energy and Combustion Science*, 37, 52-68, (2011).
- [18] Drapcho, C. M., Nhuan, N., P. and Walker, T., H., *Biofuels engineering process technology*, New York: Mc Graw Hill, 69-94, (2008).
- [19] Demirbaş, A., *Biodiesel, A realistic fuel alternative for diesel engines*, London: Springer-Verlag, 65-92, (2008).

- [20] Knothe, G., *Biodiesel handbook*, Urbana: AOCS Pres, 76-77, (2005).
- [21] No, S. Y., “Inedible vegetable oils and their derivatives for alternative diesel fuels in CI engines: A review”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15, 131-149, (2011).
- [22] Fontaras, G., Kousoulidou, M., Karavalakis, G., Bakeas, E. and Samaras, Z., “Impact of straight vegetable oilediesel blends application on vehicle regulated and non-regulated emissions over legislated and real world driving cycles”, *Biomass and Bioenergy*, 35, 3188-3198, (2011).
- [23] Misra, R. D. and Murthy, M. S., “Straight vegetable oils usage in a compression ignition engine-A review”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14, 3005-3013, (2010).
- [24] Altın, R., Çetinkaya, S. and Yücesu, H. S., “The potential of using vegetable oil fuels as fuel for diesel Engines”, *Energy Conversion and Management*, 42, 529-538, (2001).
- [25] Esteban, B., Baquero, G., Puig, R., Riba, J. R. and Rius, A., “Is it environmentally advantageous to use vegetable oil directly as biofuel instead of converting it to biodiesel?”, *Biomass and Bioenergy*, 35, 1317-1328, (2011).
- [26] Franco, Z. and Nguyen, Q.D., “Flow properties of vegetable oil-diesel fuel blends”, *Fuel*, 90, 838-843, (2011).
- [27] Hazar, H. and Aydın, H., “Performance and emission evaluation of a CI engine fueled with preheated raw rapeseed oil (RRO)-diesel blends”, *Applied Energy*, 87, 786-790, (2010).
- [28] Altun, Ş. ve Gür, M. A., “Bitkisel yağların alternatif yakıt olarak dizel motorlarında kullanılması”, *Harran Üniv. Ziraat Fak. Dergisi*, 9(3), 35-42, (2005).
- [29] Kaya, C., “Bitkisel yağlardan biyodizel üretimi”, Yüksek Lisans Tezi, *Dicle Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Diyarbakır, (2006).
- [30] Demir B., “Küçük ölçekli bir biyodizel sisteminin oluşturulması, elde edilen pamuk yağı metil esterinin motor performans testleri, enerjetik ve ekserjetik değerlendirilmesi”, Doktora Tezi, *Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İzmir, (2009).
- [31] Knothe, G., “Dependence of biodiesel fuel properties on the structure of fatty acid alkyl esters”, *Fuel Processing Technology*, 86, 1059-1070, (2005).
- [32] İleri, E. and Koçar, G., “Experimental investigation of the effect of fuel injection advance on engine performance and exhaust emission parameters using canola oil methyl ester in a turbocharged direct-injection diesel engine”, *Energy Fuels*, 23, 5191-5198, (2009).

- [33] Rakopoulos, D. C., “Heat release analysis of combustion in heavy-duty turbocharged diesel engine operating on blends of diesel fuel with cottonseed or sunflower oils and their bio-diesel”, *Fuel*, 96, 524-534, (2012).
- [34] Agarwal, A. K., “Biofuels (alcohols and biodiesel) applications as fuels for internal combustion engines”, *Progress in Energy and Combustion Science*, 33, 233-271, (2007).
- [35] Kumar, S., Cho, J. H., Park, J. and Moon, I., “Advances in diesel-alcohol blends and their effects on the performance and emissions of diesel engines”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 22, 46-72, (2013).
- [36] Laza, T. and Bereczky, A., “Basic fuel properties of rapeseed oil-higher alcohols blends”, *Fuel*, 90, 803-810, (2011).
- [37] Jin, C., Yao, M., Liu, H., Leed, C. F. and Ji, J., “Progress in the production and application of n-butanol as a biofuel”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15, 4080-4106, (2011).
- [38] Liu, H., Lee, C., Huo, M. and Yao, M., “Comparison of ethanol and butanol as additives in soybean biodiesel using a constant volume combustion chamber”, *Energy Fuels*, 25, 1837-1846, (2011).
- [39] Altun, Ş., Oner, C., Yasar, F. and Adin, H., “Effect of n-butanol blending with a blend of diesel and biodiesel on performance and exhaust emissions of a diesel engine”, *Industrial, Engineering Chemistry Research*, 50, 9425-9430, (2011).
- [40] Chotwichien, A., Luengnaruemitchai, A. and Jai-In, S., “Utilization of palm oil alkyl esters as an additive in ethanol–diesel and butanol-diesel blends”, *Fuel*, 88, 1618-1624, (2009).
- [41] Mehta, R. N., Chakraborty, M., Mahanta, P. and Parikh, P. A., “Evaluation of fuel properties of butanol-biodiesel-diesel blends and their impact on engine performance and emissions”, *Industrial, Engineering Chemistry Research*, 49, 7660-7665, (2010).
- [42] Avcı, A. ve Dönmez, S., “Biyoyakıt olarak bütanol ve fermantasyonla üretimi”, *Elektronik Mikrobiyoloji Dergisi*, 2, 1-12, (2011).
- [43] Stoeberl, M., Werkmeister, R., Faulstich, M. and Russ, W., “Biobutanol from food wastes-fermentative production, use as biofuel and the influence on the emissions”, *Procedia Food Science*, 1, 1867-1874, (2011).
- [44] Lee, S. Y., Park J. H., Jang, S. H., Nielsen, L. K., Kim, J. and Jung, K. S., “Fermentative butanol production by clostridia”, *Biotechnology and Bioengineering*, 101, 209-228, (2008).
- [45] Qureshi, N. and Ezeji, T. C., “Butanol, ‘a superior biofuel’ production from agricultural residues (renewable biomass): recent progress in technology”, *Biofuels, Bioproducts and Biorefinery*, 2, 319-330, (2008).

- [46] Ni, Y. and Sun, Z., “Recent progress on industrial fermentative production of acetone-butanol-ethanol by *Clostridium acetobutylicum* in China”, *Applied Microbiology and Biotechnology*, 83, 415-423, (2009).
- [47] Jang, Y. S., Malaviya, A., Cho, C., Lee, J. and Lee, S. Y., “Butanol production from renewable biomass by clostridia”, *Bioresource Technology*, 123, 653-663, (2012).
- [48] Sukjit, E., Herreros, J. M., Dearn, K. D., Tsolakis, A. and Theinnoi, K., “Effect of hydrogen on butanol e-biodiesel blends in compression ignition engines”, *International Journal of Hydrogen Energy*, 38, 1624-1635, (2012).
- [49] Oswald, P., Guldenberg, H., Hoinghaus, K., Yang, B., Yuan, T. and Qi, F., “Combustion of butanol isomers-A detailed molecular beam mass investigation of their flame chemistry”, *Combustion and Flame*, 158, 2-15, (2011).
- [50] Aytav E. and Koçar G., “Biodiesel from the perspective of Turkey: Past, present and future”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 25, 335-350, (2013).
- [51] T.C. Gümrük ve Ticaret Bakanlığı Kooperatifçilik Genel Müdürlüğü, “2011 yılı pamuk raporu”, 4-18, (2011).
- [52] Nelson, R., “Türkiye'nin 2011 yılı pamuk ve pamuk ürünleri raporu”, 1-8, (2011).
- [53] Fontaras, G., Tzamkiozis, T. and Hatziemmanouil, E., “Experimental study on the potential application of cottonseed oil-diesel blends as fuels for automotive diesel engines”, *Institution of Chemical Engineers*, 85, 396-403, (2007).
- [54] Rakopoulos, D. C., “Combustion and emissions of cottonseed oil and its bio-diesel in blends with either n-butanol or diethyl ether in HSDI diesel engine”, *Fuel*, 105, 603-613, (2013).
- [55] Yücel, H. L., “Pamuk yağının alternatif dizel yakıtı olarak kullanılması”, *Fırat Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 20, 185-192, (2008).
- [56] Martin, M. L. J., Geo, V. E., Singh, D. K. J. and Nagalingam, B., “A comparative analysis of different methods to improve the performance of cotton seed oil fuelled diesel engine”, *Fuel*, 102, 372-378, (2012).
- [57] Tillem, İ., “Dizel motorlar için alternatif yakıt olarak biyodizel üretimi ve kullanımı”, Yüksek Lisans Tezi, *Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Denizli, (2005).
- [58] Fernando, S., “Development of a novel biofuel blend using ethanol-biodiesel-diesel microemulsions: EB-Diesel”, *Energy Fuels*, 18, 1695-1703, (2004).
- [59] Mbarawa, M., “The effect of clove oil and diesel fuel blends on the engine performance and exhaust emissions of a compression-ignition engine”, *Biomass and Bioenergy*, 34, 155-1561, (2010).

- [60] Radu, R. and Mircea, Z., “The Use of Sunflower Oil in Diesel Engines”, *SAE Paper*, 972-979, (1997).
- [61] Rakopoulos, C. D. and Antonopoulos, K. A., “Comparative performance and emissions study of a direct injection diesel engine using blends of diesel fuel with vegetable oils or bio-diesels of various origins”, *Energy Conversion and Management*, 47, 3272-3287, (2006).
- [62] Mani, M., Nagarajan, G. and Sampath, S., “Characterisation and effect of using waste plastic oil and diesel fuel blends in compression ignition engine”, *Energy*, 36, 212-219, (2011).
- [63] Labeckas, G. and Slavinskas, S., “Performance and exhaust emission characteristics of direct-injection diesel engine when operating on shale oil”, *Energy Conversion and Management*, 46, 139-150, (2005).
- [64] Wang, Y. D. and Al-Shemmeri, T., “An experimental investigation of the performance and gaseous exhaust emissions of a diesel engine using blends of a vegetable oil”, *Applied Thermal Engineering*, 26, 1684-1691, (2006).
- [65] Misra, R. D. and Murthy, M. S., “Performance, emission and combustion evaluation of soapnut oil-diesel blends in a compression ignition engine”, *Fuel*, 90, 2514-2518, (2011).
- [66] Agarwal, A. K. and Rajamanoharan, K., “Experimental investigations of performance and emissions of karanja oil and its blends in a single cylinder agricultural diesel engine”, *Applied Energy*, 86, 106-112, (2009).
- [67] Leevijit, T. and Prateepchaikul, G., “Comparative performance and emissions of IDI-turbo automobile diesel engine operated using degummed, deacidified mixed crude palm oil–diesel blends”, *Fuel*, 90, 1487-1491, (2011).
- [68] Altun, Ş. and Bulut, H., “The comparison of engine performance and exhaust emission characteristics of sesame oil-diesel fuel mixture with diesel fuel in a direct injection diesel engine”, *Renewable Energy*, 33, 1791-1795, (2008).
- [69] Altun, Ş. ve Öner, C., “Tek Silindirli bir dizel motorunda alternatif yakıt olarak susam yağı kullanımının deneysel incelenmesi”, *Doğu Anadolu Bölgesi Araştırmaları*, 1/3, 186-189, (2004).
- [70] Shehata, M. S., Razek, S.M., “Experimental investigation of diesel engine performance and emission characteristics using jojoba/diesel blend and sunflower oil”, *Fuel*, 90, 886-897, (2011).
- [71] Rakopoulos, D. C., Rakopoulos C. D., Giakoumis, E. G., Dimaratos, A. M. and Founti M. A., “Comparative environmental behavior of bus engine operating on blends of diesel fuel with four straight vegetable oils of Greek origin: Sunflower, cottonseed, corn and olive”, *Fuel*, 90, 3439-3446, (2011).

- [72] Sayin, C., Özsezen, A. N. and Çanakcı, M., “The influence of operating parameters on the performance and emissions of a DI diesel engine using methanol-blended-diesel fuel”, *Fuel*, 89, 1407-1414, (2010).
- [73] Sayin, C., “Engine performance and exhaust gas emissions of methanol and ethanol-diesel blends”, *Fuel*, 89, 3410-3415, (2010).
- [74] Huang, J., Wang, Y., Li, S., Roskilly, A. P., Yu, H. and Li, H., “Experimental investigation on the performance and emissions of a diesel engine fuelled with ethanol-diesel blends”, *Applied Thermal Engineering*, 29, 2484-2490, (2009).
- [75] Ballesteros, R., Hernández, J. J. and Flores, J. G., “Carbonyls speciation in a typical European automotive diesel engine using bioethanol/butanol-diesel blends”, *Fuel*, 95, 136-145, (2012).
- [76] Rakopoulos, D. C., Papagiannakis, R. G., and Kyritsis, D. C., “Combustion heat release analysis of ethanol or n-butanol diesel fuel blends in heavy-duty DI diesel engine”, *Fuel*, 90, 1855-1867, (2011).
- [77] Armas, O., Contreras, R. G. and Ramos, Á., “Pollutant emissions from engine starting with ethanol and butanol diesel blends”, *Fuel Processing Technology*, 100, 63-72, (2012).
- [78] Rakopoulos, D. C., Rakopoulos, C. D., Giakoumis, E. G., Dimaratos, A. M. and Kyritsis, D. C., “Effects of butanol-diesel fuel blends on the performance and emissions of a high-speed DI diesel engine”, *Energy Conversion and Management*, 51, 1989-1997, (2010).
- [79] Rakopoulos, D. C., Hountalas, D.T., Kakaras E. C., Giakoumis, E. G. and Papagiannakis, R. G., “Investigation of the performance and emissions of bus engine operating on butanol/diesel fuel blends”, *Fuel*, 89, 2781-2790, (2010).
- [80] Doğan, O., “The influence of n-butanol/diesel fuel blends utilization on a small diesel engine performance and emissions”, *Fuel*, 90, 2467-2472, (2011).
- [81] Siwale, L., Kristof, L., Adam, T., Bereczky, A., Mbarawa, M., Penninger, A. and Kolesnikov, A., “Combustion and emission characteristics of n-butanol/diesel fuel blend in a turbo-charged compression ignition engine”, *Fuel*, 107, 409-418, (2013).
- [82] Zhang, Q., Yao, M., Zheng, Z., Liu, H. and Xu, J., “Experimental study of n-butanol addition on performance and emissions with diesel low temperature combustion”, *Energy*, 47, 515-521, (2012).
- [83] Valentino, G., Corcione, F. E., Iannuzzi, S. E. and Serra, S., “Experimental study on performance and emissions of a high speed diesel engine fuelled with n-butanol diesel blends under premixed low temperature combustion”, *Fuel*, 92, 295-307, (2011).

- [84] Lin, S. L., Lee, W. J., Lee, C. F. and Wu, Y., "Reduction in emissions of nitrogen oxides, particulate matter, and polycyclic aromatic hydrocarbon by adding water-containing butanol into a diesel-fueled engine generator", *Fuel*, 93, 364-372, (2012).
- [85] Yao, M., Wang, H., Zheng, Z. and Yue, Y., "Experimental study of n-butanol additive and multi-injection on HD diesel engine performance and emissions", *Fuel*, 89, 2191-2201, (2010).
- [86] Rakopoulos, C. D., Dimaratos, A. M., Giakoumis, E. G. and Rakopoulos, D. C., "Investigating the emissions during acceleration of a turbocharged diesel engine operating with bio-diesel or n-butanol diesel fuel blends" *Energy*, 35, 5173-5184, (2010).
- [87] Rakopoulos, C. D., Dimaratos, A. M., Giakoumis, E. G. and Rakopoulos, D. C., "Study of turbocharged diesel engine operation, pollutant emissions and combustion noise radiation during starting with bio-diesel or n-butanol diesel fuel blends", *Applied Energy*, 88, 3905-391, (2011).
- [88] Fernández, J. C., Arnal, J. M., Gómez, J. and Dorado, M. P., "A comparison of performance of higher alcohols/diesel fuel blends in a diesel engine", *Applied Energy*, 95, 267-275, (2012).
- [89] Özer, S., "Bütanol kullanımının dizel motor performansı ve egzoz emisyonlarına etkilerinin deneysel olarak araştırılması", Yüksek Lisans Tezi, *Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Karabük, (2010).
- [90] Karabektas, M. and Hosoz, M., "Performance and emission characteristics of a diesel engine using isobutanol-diesel fuel blends", *Renewable Energy*, 34, 1554-1559, (2009).
- [91] Lapuerta, M., Contreras, R.G., Fern J. C. and Dorado, M. P., "Stability, lubricity, viscosity, and cold-flow properties of alcohol-diesel blends", *Energy Fuels*, 24, 4497-4502, (2010).
- [92] Guarieiro, L. L. and N, Souza, A. F., "Emission profile of 18 carbonyl compounds, CO, CO₂, and NO_x emitted by a diesel engine fuelled with diesel and ternary blends containing diesel, ethanol and biodiesel or vegetable oils", *Atmospheric Environment*, 43, 2754-2761, (2009).
- [93] Lujaji, F., Kristóf, L., Bereczky, A. and Mbarawa, M., "Experimental investigation of fuel properties, engine performance, combustion and emissions of blends containing croton oil, butanol, and diesel on a CI engine", *Fuel*, 90, 505-510, (2011).
- [94] Lujaji, F., Bereczky, A., Janosi, L., Novak, C. and Mbarawa, M., "Cetane number and thermal properties of vegetable oil, biodiesel, 1-butanol and diesel blends", *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 102, 1175-1181, (2010).

- [95] Weerachanchai, P., Tangsathitkulchai, C. and Tangsathitkulchai, M., “Phase behaviors and fuel properties of bio-oil-diesel-alcohol blends”, *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 56, 387-393, (2009).
- [96] Wagner, E. P., Lambert, P. D., Moyle, T. M. and Koehle M. A., “Diesel vehicle performance on unaltered waste soybean oil blended with petroleum fuels”, *Fuel*, 107, 757-765, (2013).
- [97] Labeckas, G. and Slavinskas, S., “Comparative performance of direct injection diesel engine operating on ethanol, petrol and rapeseed oil blends”, *Energy Conversion and Management*, 50, 792-801, (2009).
- [98] Qi, D. H., Bae, C., Feng, Y. M., Jia, C. C. and Bian Y. Z., “Combustion and emission characteristics of a direct injection compression ignition engine using rapeseed oil based micro-emulsions”, *Fuel*, 107, 570-577, (2013).
- [99] Atmanlı, A., Yüksel B. and İleri E., “Experimental investigation of the effect of diesel-cotton oil-n-butanol ternary blends on phase stability, engine performance and exhaust emission parameters in a diesel engine”, *Fuel*, 109, 503-511, (2013).
- [100] Ganapathy, T., Murugesan, K. and Gakkhar R. P., “Performance optimization of Jatropha biodiesel engine model using Taguchi approach”, *Applied Energy*, 86, 2476-2486, (2009).
- [101] Saravanan, S., Nagarajan, G. and Sampath, S., “Multi response optimization of NO_x emission of a stationary diesel engine”, *Fuel*, 89, 3235-3240, (2010).
- [102] Ismail, H. M., Ng, H. K., Queck, C. W. and Gan, S., “Artificial neural networks modelling of engine-out responses for a light-duty diesel engine fuelled with biodiesel blends”, *Applied Energy*, 92, 769-777, (2012).
- [103] İleri, E., Karaoğlan, D. and Atmanli, A., “Response surface methodology based prediction of engine performance and exhaust emissions of a diesel engine fuelled with canola oil methylester”, *Renewable and Sustainable Energy*, doi: 10.1063/1.4811801, (2013).
- [104] Pandian, M., Sivapirakasam, S. P. and Udayakumar, M., “Investigation on the effect of injection system parameters on performance and emission characteristics of a twin cylinder compression ignition direct injection engine fuelled with pongamia biodiesel-diesel blend using response surface methodology”, *Applied Energy*, 88, 2663-2676, (2011).
- [105] Tsai, J., Chen, S., Chiu, Y., Chen, L. and Tsai, C., “Study of biodiesel-ethanol blends on diesel engine performance and emissions using response surface method”, *ISMAB-6*, Jeonju, Korea, 877-882, (2012).
- [106] Acaroğlu, M., *Alternatif Enerji Kaynakları*, İstanbul: Atlas Yayınları, 87-89, (2007).

[107] İleri, E., “Kanola yağı metil esterinin dizel motor performansı ve emisyonlarına etkilerinin deneysel olarak incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İzmir, (2005).

[108] REN21, “*Renewables 2012 global status report*”, 31-3, (2012).

[109] İleri, E., “Biyodizele antioksidan eklenmesinin NO_x emisyonuna etkilerinin deneysel olarak incelenmesi”, Doktora Tezi, *Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İzmir, (2012).

[110] Koçak, M. S., “Fındık yağı metil esterinin dizel motorlarda alternatif yakıt olarak kullanımının deneysel olarak araştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, (2005).

[111] Danışman A., “Bitkisel yağlardan değerli kimyasallar ve biyodizel üretimi”, Yüksek Lisans Tezi, *Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Eskişehir, (2008).

[112] Strayer, D., *Food fats and oils*, Washington: ISEO, 1-12, (2006).

[113] Karaca E. ve AYTAÇ S., “Yağ bitkilerinde yağ asitleri kompozisyonu üzerine etki eden faktörler”, *Ondokuz Mayıs Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 22 (1), 123-131, (2007).

[114] Akçay, H. T., “Bazı bitkisel yağlardan biyodizel üretimi”, Yüksek Lisans Tezi, *Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Trabzon, (2006).

[115] Karaosmanoğlu, F. ve H.A. Aksoy., “Kullanılmış kızartma atık yağının seyreltme yöntemi ile alternatif yakıt olarak değerlendirilmesi”, *Türkiye 6. Enerji Kongresi*, İzmir, 461, (1994).

[116] Lin, L., Cunshan, Z., Vittayapadung, S., Xiangqian, S. and Mingdong, D., “Opportunities and challenges for biodiesel fuel”, *Applied Energy*, 88, 1020-1031, (2011).

[117] Atabani, A. E., Silitonga, A. S., Ong, H. C. and Mahlia, T. M. I., “Non-edible vegetable oils: A critical evaluation of oil extraction, fatty acid compositions, biodiesel production, characteristics, engine performance and emissions production”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 18, 211-245, (2013).

[118] Ilić, I., Stamenković, O. S. and Veljković, V. B., “Biodiesel production from non-edible plant oils”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16, 3621-3647, (2012).

[119] Borugadda, V. B. and Goud V. V., “Biodiesel production from renewable feedstocks: Status and opportunities”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16, 4763-4784, (2012).

[120] Salvi, B. L. and Panwar, N. L., “Biodiesel resources and production technologies-A review”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16, 3680-3689, (2012).

- [121] Russo, D., Dassisti, M., Lawlor, V. and Olabi, A. G., “State of the art of biofuels from pure plant oil”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16, 4056-4070, (2012).
- [122] Shahidi, F., *Bailey's Industrial Oil and Fat Products*, San Francisco: John Wiley, 173-220, (2005).
- [123] Agarwal, D. K., “Cottonseed oil quality, utilization and processing”, 3-16, (2003).
- [124] Yücel, H. L., “Dizel yakıtına belirli oranlarda karıştırılmış pamuk yağının motor performansı ve emsiyon karakteristikleri üzerindeki etkilerinin araştırılması”, Doktora Tezi, *Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Elazığ, (1998).
- [125] Top, T. B. ve Uçum İ., “Türkiye’de bitkisel yağ açığı”, *Tarımsal Ekonomi ve Politika Geliştirme Enstitüsü*, Ankara, 1-8, (2012).
- [126] Göksu, Ç., “Bitkisel yağlar”, İGEME, 1-5, (2007).
- [127] Özüdoğru, T., “Durum ve tahmin pamuk 2011/2012”, TEPGE, 1-15, (2011).
- [128] Alkaya, E., “Lif pamuk üretimi yan ürünlerinin/artıklarının katma değerli ürünlere dönüştürülmesi: mevcut uygulamalar ve teknolojik gelişmeler”, 2. *Ulusal Katı Atık Yönetimi Kongresi*, Mersin, (2010).
- [129] Hışır, V., “Bütanol-benzin karışımlarının buji ile ateşlemeli motorların performans ve egzoz emisyonlarına etkilerinin araştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, *Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Karabük, (2010).
- [130] García, V., Päckilä, J., Ojamo, H., Muurinen, E. and Keiski, R. L., “Challenges in biobutanol production: How to improve the efficiency?”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15, 964-980, (2011).
- [131] Green, E. M., “Fermentative production of butanol-the industrial perspective”, *Current Opinion in Biotechnology*, 22, 337-343, (2011).
- [132] Hansen, A.C., Zhang, Q. and Lyne, P. W. L., “Ethanol-diesel fuel blends-a review”, *Bioresource Technology*, 96, 277-285, (2005).
- [133] Gu, X., Huang, Z., Wu, S. and Li, Q., “Laminar burning velocities and flame instabilities of butanol isomers–air mixtures”, *Combustion and Flame*, 157, 2318-2325, (2010).
- [134] Veloo, P. S., Wang, Y. L., Egolfopoulos, F. N. and Westbrook, C. K., “A comparative experimental and computational study of metanol, etanol, and n-butanol flames”, *Combustion and Flame*, 157, 1989-2004, (2010).
- [135] Sarathy, S. M., Thomson, M. J., Togbe, C., Dagautb, P., Halter, F. and Rousselle, C. M., “An experimental and kinetic modeling study of n-butanol combustion”, *Combustion and Flame*, 156, 852-864, (2009).

- [136] Acaroğlu M., *Yakıtlar ve yanma*, Ankara: Nobel, 25-42, (2010).
- [137] Uyumaz, A., “Pamuk yağı esaslı biyodizel ile çalışan bir dizel motorunda yakıt püskürtme avansının motor performansına ve egzoz emisyonlarına etkileri”, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, (2009).
- [138] Heywood, J. B., *Internal Combustion Engine Fundamentals*, USA: Mc Graw Hill, 490-685, (1988).
- [139] Ergenç A. T., “Biodizel yakıt ile çalışan motordaki püskürtmenin performans ve emisyon yönünden optimizasyonu”, Doktora Tezi, *Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, (2009).
- [140] Argachoy C. and Pimenta A. P., “Phenomenological model of particulate matter emission from direct injection diesel engines”, *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 23, 266-273, (2005).
- [141] Warnatz, J., Maas, U. and Dibble R. W., *Combustion*, Berlin: Springer-Verlag, 45-67, (2006).
- [142] Borat, O., Sürmen, A. ve Balcı, M., *İten yanmalı motorlar*, İstanbul: Birsen Yayınevi, 89-132, (2008).
- [143] McAllister, Chen, S. J. and Fernandez, P. A. C., *Fundamentals of combustion processes*, London: Springer-Verlag, 199-227, (2011).
- [144] Giakoumis, E. G., Rakopoulos, C. D., Dimaratos, A. M. and Rakopoulos, D. C., “Exhaust emissions with ethano lor n-butanol diesel fuel blends during transient operation: A review”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 17, 170-190, (2013).
- [145] Majewski, A. W. and Khair, M. K., *Diesel emission and their control*, USA: SAE, 121-143, (2006).
- [146] Bacha J., *Diesel fuels technical review*, San Ramon: Chevron, 41-45, (2007).
- [147] Kutlar, O., Ergeneman, M., Arslan, H. ve Mutlu, M., *Taşıt egzozundan kaynaklanan kirleticiler*, İstanbul: Birsen Yayınevi, 52-75, (1998).
- [148] ASTM D1217, *Standard test method for density and relative density (specific gravity) of liquids by bingham pycnometer*, 1-5, (2003).
- [149] Lapuerta, M., Armas, O. and Contreras, R. G., “Stability of diesel-bioethanol blends for use in diesel engines”, *Fuel*, 86, 1351-1357, (2007).
- [150] Han, X., Zheng, M. and Wang, J., “Fuel suitability for low temperature combustion in compression ignition engines”, *Fuel*, doi:10.1016/j.fuel.2013.01.049, (2013).

- [151] Joshi, R. M. and Pegg, M. J. ,“Flow properties of biodiesel fuel blends at low temperatures”, *Fuel*, 86, 143-151, (2007).
- [152] Gönül, N., *Çok fazlı sistemler-I yüzey kimyası ve kolloidler*, Ankara: Üniversitesi Eczacılık Fakültesi Yayınları-81, 19-27, (2000).
- [153] Dunn R. O. and Bagby, M. O., “Low-temperature phase behavior of vegetable oil/co-solvent blends as alternative diesel fuel”, *JAOCs*, Vol. 77, 12, 1315-1322, (2000).
- [154] Attaphong, C., Do, L. and Sabatini, D. A., “Vegetable oil-based microemulsions using carboxylate-based extended surfactants and their potential as an alternative renewable biofuel”, *Fuel*, 94, 606-613, (2012).
- [155] Schwab, A.W., Bagby, M.O. and Freedman, B., “Preparation and properties of diesel fuels from vegetables oils”, *Fuel*, 66, 1372-1378, (1987).
- [156] Sexton, M.D., A.K. Smith, J. Bock, M.L. Robbins, S.J. Pace, and P.G. Grimes, “Microemulsion diesel fuel compositions and method of use”, *Eur. Patent*, EP 0 475 620 A2, (1992).
- [157] Metler Toledo, *Basic of titration*, Switzerland, 6-12, (2009).
- [158] Montgomery, D.C. *Design and analysis of experiments*, New York: John Wiley, 3-10, (2005).
- [159] Besterfield, D. H., *Total quality management*, New Jersey: Prentice Hall, 447-449, (2011).
- [160] Breyfogle F., *Implementing six sigma: smarter solutions using statistical methods*, New York: John Wiley, 549-575, (2003).
- [161] BC Transit, “*Biodiesel blending guide*”, 3-13, (2008).
- [162] Schoo, R. and Hoxie, A., “Basic properties of refined, bleached and deodorized soybean oil-butanol blends”, *Fuel*, 102, 701-708, (2012).
- [163] Kashinath, S. A., Manan, Z. A., Hashim, H. and Alwi W., “Design of green diesel from biofuels using computer aided technique”, *Computers and Chemical Engineering*, doi:10.1016/j.compchemeng.2012.03.006, (2012).
- [164] Verduzco, L. F., Rodríguez, J. E. and Jacob, A. R., “Predicting cetane number, kinematic viscosity, density and higher heating value of biodiesel from its fatty acid methyl ester composition”, *Fuel*, 91, 102-111, (2012).
- [165] TS 1231, *İçten yanmalı motorlar-muayene ve deney esasları*, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, (1991).

[166] TS 11365, *Karayolu taşıtları-trafikteki dizel motorlu taşıtlar için egzoz gazı kirleticileri ölçme metodu ve sınır değerleri*, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, (1998).

[167] Chen, Z., Liu, J., Han, Z., Du, B., Liu, Y. and Lee C., “Study on performance and emissions of a passenger-car diesel engine fueled with butanol-diesel blends”, *Energy*, doi:/10.1016/j.energy.2013.03.054, (2013).

[168] Ryan, T. and Maly, R. R., *Flow and Combustion in reciprocating engines*, Berlin: Springer-Verlag, 381-418, (2008).

[169] Mollenhauer K. and Tschoeke H., *Handbook of diesel engines*, Berlin:Springer-Verlag, 66-86, (2010).

[170] Asan, H. ve Namlı L., “Deneysel ısı transferi ve basınç kaybı çalışmalarında belirsizlik analizi”, *ULIBIK 97*, Edirne, (1997).

[171] Holman, J. P., *Experimental methods for engineers*, New York: McGraw-Hill, 571-652, (1994).

[172] Kline, S. J. and Mc Clintock, F. A., *Describing uncertainties in single sample experiments*, Mechanical Engineering, 3-8, (1953).