

**BİYODİZELİN SİLİNDİR İÇİ
KAREKTERİSTİKLERİNE
ETKİLERİ VE WAVELET ANALİZ
TEKNİĞİ İLE ÇEVİRİMSSEL FARKLARA
ETKİLERİNİN İNCELENMESİ**

Şükran EFE

Doktora Tezi

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Prof. Dr. M. Akif CEVİZ

2014

Her Hakkı Saklıdır

**ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

DOKTORA TEZİ

**BİYODİZELİN SİLİNDİR İÇİ KAREKTERİSTİKLERİNE ETKİLERİ VE
WAVELET ANALİZ TEKNİĞİ İLE ÇEVİRİMSEL FARKLARA ETKİLERİNİN
İNCELENMESİ**

Şükran EFE

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**ERZURUM
2014**

Her Hakkı Saklıdır



**T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**



TEZ ONAY FORMU

**BİYODİZELİN SİLİNDİR İÇİ KAREKTERİSTİKLERİNE ETKİLERİ VE
WAVELET ANALİZ TEKNİĞİ İLE ÇEVİRİMSEL FARKLARA
ETKİLERİNİN İNCELENMESİ**

Prof. Dr. M. Akif CEVİZ danışmanlığında, Şükran EFE tarafından hazırlanan bu çalışma 25/02/2014 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda doktora tezi olarak **oybirliği** ile kabul edilmiştir.

Başkan : Prof.Dr. Fikret YÜKSEL

İmza :

Üye : Prof.Dr. M. Akif CEVİZ

İmza :

Üye : Doç.Dr. Kemal ÇOMAKLI

İmza :

Üye : Yrd.Doç.Dr. Bülent ÇAVUŞOĞLU

İmza :

Üye : Yrd.Doç.Dr. Hakan TEMUR

İmza :

Yukarıdaki sonucu onaylıyorum

Prof. Dr. İhsan EFEOĞLU
Enstitü Müdürü

Bu çalışma BAP projesi kapsamında desteklenmiştir.
Proje No: 2011-133

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaklardan yapılan bildirişlerin, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak olarak kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

ÖZET

Doktora Tezi

BIYODİZELİN SİLİNDİR İÇİ KARAKTERİSTİKLERİNE ETKİLERİ VE WAVELET ANALİZ TEKNİĞİ İLE ÇEVİRİMSSEL FARKLARA ETKİLERİNİN İNCELENMESİ

Şükran EFE

Atatürk Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. M. Akif CEVİZ

Petrol kökenli yakıtların azalması ve artan maliyeti, içten yanmalı motorlarda yanması sonucu oluşan emisyonların olumsuz etkisi nedeniyle, özellikle dizel motor yakıtlarına alternatif kaynak talebi çok yüksektir. Dizel motorlarda kullanılan dizel yakıtlar, yakıtın kimyasal enerjisinin mekanik enerjiye dönüştürülmesi nedeniyle çoğunlukla taşımacılık sektöründe kullanılmaktadır. Biyodizel, farklı çeşit yağlardan üretilen alternatif bir dizel yakıtıdır. Biyodizel, dizel motorlarda büyük modifikasyonlar yapılmaksızın dizel yakıtın yerine kullanılabilir. Biyodizel farklı fiziksel ve kimyasal özelliklerinden dolayı, dizel yakıt ile karşılaştırıldığında, dizel motorlarda kullanımında bazı avantaj ve dezavantajlara sahiptir.

Bu çalışmada, saf biyodizel ve biyodizel-dizel karışımları, iki silindirli, direk enjeksiyonlu dizel motorda kullanılmıştır. Biyodizel, beş farklı bitkisel yağdan (kanola, ayçiçeği, mısır, fındık, soya fasulyesi) üretilmiştir. Biyodizel ve karışımlarının etkisi, motor efektif performans değişiminde ve egzoz emisyon karakteristiklerinde gözlemlenmiştir. Ayrıca, indike ortalama efektif basınç ve diğer indike motor performans karakteristiklerindeki değişim gibi silindir içi basınç verileri kullanılarak yanma kararlılığı ve çevrimsel farklılıklar incelenmiş, motor performans karakteristikleri ile bu parametrelerin ilişkisi analiz edilmiştir. Ayrıca FME'nin soğukta ilk çalışma performansı incelenmiştir. Çevrimsel farklılıklar üzerine biyodizelin etkisini görmek amacıyla Wavelet analiz metodu kullanılmıştır.

2014, 210 sayfa

Anahtar Kelimeler: Biyodizel, dizel motor, motor karakteristikleri ve emisyonları, çevrimsel farklar, Wavelet Analiz Metodu

ABSTRACT

Ph. D. Thesis

ANALYSING THE EFFECTS OF BIODIESEL ON THE CYLINDER'S CHARACTERISTICS AND CYCLE TO CYCLE VARIATIONS THROUGH WAVELET ANALYSIS METHOD

Şükran EFE

Atatürk University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Mechanical Engineering

Supervisor: Prof. Dr. M. Akif CEVİZ

Due to the shortage of petroleum based fuels, their increasing costs and the negative effects of the emissions produced from the combustion in internal combustion engines, an alternate source of this type of fuels especially for diesel engines is very much needed. Diesel fuel which is used in the diesel engines is largely utilized in transportation sector for the generation of mechanical energy by converting its chemical energy. Biodiesel is an alternative diesel fuel produced from different types of oils. It can replace diesel fuel in diesel engines without major modifications. Because of the different chemical and physical properties of biodiesel when compared to the diesel fuel, the using of biodiesel in diesel engines causes some advantageous and disadvantageous results.

In this study, an experimental investigation has been conducted on a two cylinder, direct injection diesel engine using neat and blends of biodiesel with diesel fuel. Biodiesel has been produced from five different types of vegetable oils; canola, sunflower, corn, hazelnuts and soybean. The effects of biodiesel and biodiesel blends have been observed on the variations of engine brake performance and exhaust emission characteristics. Additionally, combustion stability and cyclic variations observed by using in-cylinder pressure data as a variation in indicated mean effective pressure and other indicated engine performance characteristics have been studied to analyze the relation of these parameters with engine performance characteristics. Additionally, the cold start performance of engine fuelled with FME has been analyzed. Wavelet analysis method has been used to see the effects of biodiesel on cyclic variations.

2014, 210 pages

Keywords: Biodiesel, diesel engine, engine's characteristics and emissions, cycle-to-cycle variations, Wavelet Analysis method

TEŞEKKÜR

Doktora çalışmalarında her türlü yardım ve desteğini esirgemeyen, bilgisi ve tecrübesi ile çalışmamı yönlendiren tez danışmanım Sayın Prof.Dr. M. Akif CEVİZ'e içtenlikle teşekkürlerimi sunarım.

Biyodizel üretim deneylerinde ve testlerinde bana her hususta yardım eden, karşılaştığım her problemi içtenlikle çözen, yol gösteren Sayın Yrd. Doç. Dr. Hakan TEMUR'a en kalbi duygularıyla teşekkür ederim.

Deneysel sistemimin hazırlanmasında ki büyük katkı ve emeğinden dolayı Sayın Metin ÖZNÜLÜER'e ve manevi desteğini her daim esirgemeyen sevgili arkadaşım, dostum Yrd. Doç. Dr. Aslıhan KURNUÇ'a teşekkür ediyorum.

Desteklerini esirgemeyen, her an yanımda olan canım aileme minnet ve şükranlarımı sunarım.

Şükran EFE

Ocak, 2014

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
SİMGELER DİZİNİ.....	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	ix
ÇİZELGELER DİZİNİ	xii
1. GİRİŞ.....	1
2. KURAMSAL TEMELLER.....	17
2.1. İçten Yanmalı Motorlar	17
2.1.1. Yakıtların fiziko-kimyasal özellikleri	20
2.1.1.a. Tutuşma meyli	23
2.1.1.b. Tutuşma gecikme zamanı	24
2.1.1.c. Setan sayısı	26
2.1.1.d. Yakıt atomizasyonu	28
2.1.1.e. Viskozite	29
2.1.1.f. Soğuk akış özelliği	30
2.1.1.g. Alevlenme noktası sıcaklığı	31
2.1.1.h. Isıl değer	32
2.1.2. Motor karakteristik özellikleri.....	32
2.1.2.a. Tork	32
2.1.2.b. Efektif güç	34
2.1.2.c. İndike çevrim işi	34
2.1.2.d. Ortalama efektif basınç	36
2.1.2.e. Efektif yakıt tüketimi.....	37
2.1.2.f. Efektif verim	38
2.1.3. Egzoz emisyon değerleri	38
2.1.3.a. Azot oksit emisyonu	40
2.1.3.b. Karbonmonoksit emisyonu.....	45
2.1.3.c. Karbondioksit emisyonu.....	47

2.1.3.d. Kükürt emisyonu	49
2.1.3.e. Hidrokarbon emisyonu	49
2.1.3.f. Partikül ve duman yoğunluğu	51
2.1.4. Motorlarda çevrimsel farklar	55
2.2. Bitkisel Yağlar	58
2.2.1. Yağlar ve yağ asitleri	65
2.2.1.a. Doymuş yağ asitleri	67
2.2.1.b. Doymamış yağ asitleri	68
2.2.2. Bitkisel yağlardan yakıt elde etme yöntemleri	70
2.2.2.a. Dizel ile karıştırma	71
2.2.2.b. Isıl işlem	72
2.2.2.c. Piroлиз	72
2.2.2.d. Mikro-emülsiyon	73
2.2.2.e. Transesterifikasyon	74
2.3. Biyodizel	83
2.3.1. Biyodizelin faydaları	85
2.3.2. Biyodizelin sakıncaları	86
2.3.3. Biyodizelin fiziko-kimyasal özellikleri	87
2.3.3.a. Viskozite	88
2.3.3.b. Setan sayısı	89
2.3.3.c. Soğuk akış	91
2.3.3.d. Isıl değeri	91
2.3.3.e. Yağlayıcılık	92
2.3.3.f. Kararlılık	93
2.3.3.g. Malzeme çözücülüğü	98
2.3.3.h. Ayrıştırılabilirlik	98
2.3.3.i. Depolanabilirlik	99
2.3.4. Motor karakteristik özellikleri	99
2.3.5. Egzoz emisyon değerleri	100
2.4. Wavelet Analiz Metodu	102
2.4.1. Sinyal ve zaman dizileri	102
2.4.2. Fourier dönüşümü	104

2.4.3. Wavelet analiz metodu	106
2.4.3.a. Sürekli Wavelet analiz metodu (SWA)	110
2.4.3.b. Ayrık Wavelet analiz metodu (AWA).....	111
3. MATERYAL ve YÖNTEM.....	113
3.1. Biyodizel Üretim Prosesi.....	113
3.2. Biyodizel Testleri	123
3.3. Motor Testleri.....	129
3.4. Wavelet Analiz Testleri.....	138
4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA.....	139
4.1. Fiziksel ve Kimyasal Özellikler	140
4.2. Motor Karakteristikleri.....	147
4.3. Egzoz Emisyonları	160
4.4. Çevrimsel Basınç Farklarının COV Analizi ile İncelenmesi	180
4.5. Çevrimsel Basınç Farklarının Wavelet Analizi Metoduyla İncelenmesi	187
4.5.1. Dizel yakıtı a ait Pmi değerlerinin Wavelet analizi.....	188
4.5.2. AME yakıtına ait Pmi değerlerinin Wavelet analizi	189
4.5.2. FME yakıtına ait Pmi değerlerinin Wavelet analizi	190
4.5.2. SME yakıtına ait Pmi değerlerinin Wavelet analizi	192
4.5.2. KME yakıtına ait Pmi değerlerinin Wavelet analizi	192
4.5.2. MME yakıtına ait Pmi değerlerinin Wavelet analizi.....	194
4.6. Soğukta Çalışma Performansı	195
5. SONUÇ	201
KAYNAKLAR	204
EKLER.....	209
EK-1	210
ÖZGEÇMİŞ	211

SİMGELER DİZİNİ

b_e	Efektif yakıt sarfiyatı
f	Frekans
P	Güç
P_e	Efektif güç
s	Ölçek
T	Periyot
τ	Kaydırma parametresi
$1/\sqrt{s}$	Normalizasyon faktörü
w	Açısal hız
$w(t)$	Zaman pencere fonksiyonu
$\psi(t)$	Dalgacık fonksiyonu
η_e	Efektif verim
H/Y	Hava/yakıt oranı
Y/H	Yakıt/hava oranı

Kısaltmalar

AME	Ayçiçek biyodizeli metil ester
AWA	Ayrık Wavelet analizi
B20	%80 dizel+%20 biyodizel
B50	%50 dizel+%50 biyodizel
B100	%0 dizel+%100 biyodizel
CFPP	Soğuk filtre tıkanma noktası sıcaklığı
CP	Bulutlanma noktası sıcaklığı
DI	Direk enjeksiyonlu dizel motor
DY	Dizel Yakıt
FME	Fındık biyodizeli metil ester
FP	Akma noktası sıcaklığı
GWS	Global Wavelet spektrumu
H/Y	Hava/yakıt oranı
IDI	Endirek enjeksiyonlu dizel motor

KME	Kanola biyodizeli metil ester
LTFT	Düşük sıcaklıklı akma testi
MME	Mısır biyodizeli metil ester
SWA	Sürekli Wavelet analizi
SME	Soya biyodizeli metil esteri
TG	Tutuşma gecikmesi
WPS	Wavelet güç spektrumu
YAEE	Yağ asit eti esteri
YAME	Yağ asit metil esteri

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Enerji fiyatları.....	1
Şekil 1.2. Dünya enerji tüketiminin birincil enerji kaynaklarına göre dağılımı	3
Şekil 1.3. Yıllara göre yayın dağılımı	8
Şekil 2.1. İçten yanmalı motorların sınıflandırılması	19
Şekil 2.2. İçten yanmalı motorların sınıflandırılması	20
Şekil 2.3. Bir dizel motordaki basınç-krank mili açısı değişimi.....	24
Şekil 2.4. Sprey oluşum şekli.....	29
Şekil 2.5. Hidrolik dinamometre.....	33
Şekil 2.6. Bir motor çevrimine ait P-V diyagramı	35
Şekil 2.7. NO _x emisyonunun değişimi (motor hızına ve hava-yakıt oranına göre)	43
Şekil 2.8. Soğutucu çıkış sıcaklığının NO _x emisyonuna etkisi	43
Şekil 2.9. Nemin NO _x emisyonları üzerine etkisi	44
Şekil 2.10. DI ve IDI motorlardaki NO _x emisyonunun değişimi	44
Şekil 2.11. Yakıt-hava oranına bağlı, CO ve CO ₂ konsantrasyon değişimi	46
Şekil 2.12. CO ₂ çevrimi	48
Şekil 2.13. HC değişimi	50
Şekil 2.14. TG zamanı ve HC ilişkisi	51
Şekil 2.15. Partikül madde içeriği.....	52
Şekil 2.16. Bir dizel motordaki çevrimsel fark	57
Şekil 2.17. Triglicerid oluşumu (Agarwal 2007)	58
Şekil 2.18. Türkiye bitkisel sıvı yağ tüketimleri	60
Şekil 2.19. Transesterifikasyon reaksiyonu	75
Şekil 2.20. Transesterifikasyon reaksiyonun dönüşümü.....	76
Şekil 2.21. Metil alkol ve etil alkol reaksiyon farkı.....	79
Şekil 2.22. Katalizörlerin sınıflandırılması.....	80
Şekil 2.23. Diels-Alder reaksiyonu.....	96
Şekil 2.24. Zaman içerisinde frekans değişimi	105
Şekil 2.25. Kısa zamanlı Fourier Dönüşümü	105
Şekil 2.26. Zaman-genlik alanından, zaman-ölçek alanına geçiş	107

Şekil 2.27. Sinüs dalgası ve bir dalgacık örneği	107
Şekil 2.28. Sinüsoid ve dalgacıkta ölçek faktörü	109
Şekil 3.1. Biyodizel üretim prosesi	113
Şekil 3.2. Transesterifikasyon reaksiyon şeması	113
Şekil 3.3. Biyodizel üretim deney düzeneği	117
Şekil 3.4. Metil alkol ve potasyum hidroksit karışımının hazırlanması	118
Şekil 3.5. Ana reaksiyonun hazırlanması	118
Şekil 3.6. Ayırma hunisinde gliserinin ayrıştırılması	119
Şekil 3.7. Ayırma hunisinde saf su ile yıkama	119
Şekil 3.8. Vakumlu buharlaştırıcı	120
Şekil 3.9. Biyodizel üretiminde kullanılan cihaz detayları	122
Şekil 3.10. Biyodizel testlerinde kullanılan cihaz detayları	128
Şekil 3.11. Deney düzeneği resmi	132
Şekil 3.12. Deney düzeneği yerleşim planı	133
Şekil 3.13. Deney düzeneğine ait resim	134
Şekil 3.14. LABVIEW program ara yüzü	135
Şekil 3.15. Basınç program ölçüm ara yüzü	136
Şekil 3.16. Sıcaklık ölçüm program ara yüzü	137
Şekil 3.17. Kamera görüntüleri	137
Şekil 4.1. Viskozite değerlerinin karşılaştırılması	141
Şekil 4.2. Isıl değerlerin karşılaştırılması	143
Şekil 4.3. Parlama noktası sıcaklık değerlerinin karşılaştırılması	144
Şekil 4.4. Akma noktası sıcaklık değerlerinin karşılaştırılması	145
Şekil 4.5. Bulutlanma noktası sıcaklık değerlerinin karşılaştırılması	146
Şekil 4.6. Soğuk filtre tıkanma noktası sıcaklık değerlerinin karşılaştırılması	146
Şekil 4.7. Yakıtların efektif güç değerleri	150
Şekil 4.8. Efektif güç değerlerindeki değişim miktarları	151
Şekil 4.9. Yakıtlara ait özgül yakıt tüketim değerleri	154
Şekil 4.10. Efektif yakıt tüketim değerlerindeki değişim miktarları	155
Şekil 4.11. Yakıtlara ait efektif verim değerleri	158
Şekil 4.12. Efektif verim değerlerindeki değişim miktarları	159
Şekil 4.13. CO emisyon miktarları	162

Şekil 4.14. CO emisyon değerlerindeki değişim miktarları.....	163
Şekil 4.15. CO ₂ emisyon miktarları	166
Şekil 4.16. CO ₂ emisyonları değerlerindeki değişim miktarları	167
Şekil 4.17. NO emisyon miktarları	170
Şekil 4.18. NO emisyonları değerlerindeki değişim miktarları	171
Şekil 4.19. HC emisyon miktarları	174
Şekil 4.20. HC emisyon değerlerindeki değişim miktarları.....	175
Şekil 4.21. Duman miktarları.....	178
Şekil 4.22. Duman değerlerindeki değişim miktarları	179
Şekil 4.23. İndike motor karakteristiklerinin değişimi (2000 d/dak).....	183
Şekil 4.24. Yakıtların setan sayıları.....	184
Şekil 4.25. İndike motor karakteristiklerinin değişimi (1400 d/dak).....	187
Şekil 4.26. Dizel yakıtına ait Pmi değerlerinin Wavelet analizi	189
Şekil 4.27. AME'ne ait Pmi değerlerinin Wavelet analizi	190
Şekil 4.28. FME'ne ait Pmi değerlerinin Wavelet analizi.....	191
Şekil 4.29. SME'ne ait Pmi değerlerinin Wavelet analizi.....	193
Şekil 4.30. KME'ne ait Pmi değerlerinin Wavelet Analizi	194
Şekil 4.31. MME'ne ait Pmi değerlerinin Wavelet Analizi	195
Şekil 4.32. Emme havası sıcaklık değişimi	196
Şekil 4.33. Motorun ilk çalışma Pmi değerleri	199
Şekil 4.34. Soğuk çalışma durumunda CO emisyonu	200

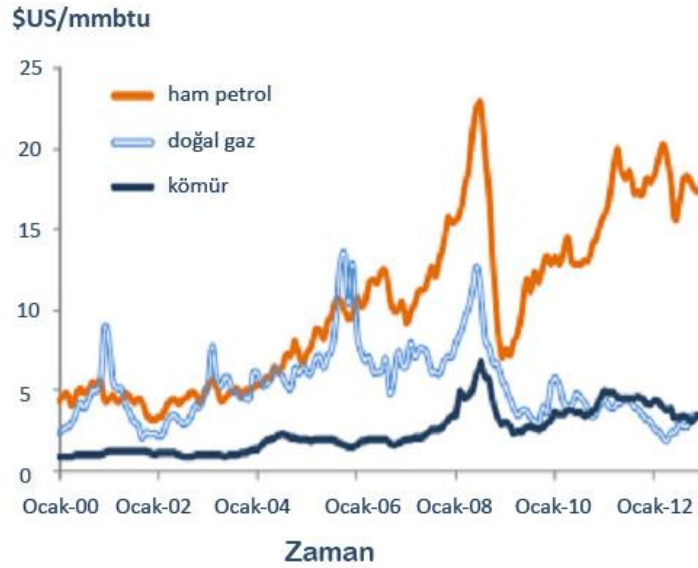
ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 1.1. Ağır dizel motorlar için avrupa emisyon standartları	2
Çizelge 1.2. Literatürde biyodizel kullanılan dizel motor çalışmalarının istatistikleri.....	9
Çizelge 2.1. ASTM D975 Dizel motorlarında kullanılan yakıt özellikleri	23
Çizelge 2.2. Bazı bitkisel yağların fiziko-kimyasal özellikleri.....	61
Çizelge 2.3. Türkiye’deki yağlı tohum üretim miktarları [ton]	62
Çizelge 2.4. Bitkisel yağlardaki yağ asit oranları	67
Çizelge 2.5. Doymuş yağ asitleri	68
Çizelge 2.6. Doymamış yağ asitleri	69
Çizelge 2.7. Dünya biyodizel potansiyelleri	85
Çizelge 2.8. EN 14214 Avrupa Standartı	88
Çizelge 2.9. Ağır dizel motorlar için Avrupa Emisyon Standartları	89
Çizelge 2.10. Motor karakteristiklerinin literatürde dağılım oranları.....	100
Çizelge 2.11. Emisyon değerlerindeki farklılıkların literatürdeki dağılımı oranları.....	101
Çizelge 3.1. Bitkisel yağların özellikleri.....	124
Çizelge 3.2. Biyodizel numunelerinin özellikleri	125
Çizelge 3.3. Biyodizel yağ asit oranları	126
Çizelge 3.4. Biyodizel elementel analiz sonuçları	127
Çizelge 3.5. Deney düzeneğinde kullanılan dizel motora ait teknik özellikler	130
Çizelge 3.6. Euro-Dizel fiziko-kimyasal özellikleri (tespit edilen)	131
Çizelge 3.7. Basınç transdüzer özellikleri.....	136

1. GİRİŞ

Artan dünya nüfusu, gelişen teknoloji ve yükselen yaşam standartları nedeniyle enerji talebi de tüm dünyada hızlı bir şekilde artmaktadır. Talep; karbon esaslı yer altı kaynaklarının rastgele çıkarılmasına, bilinçsiz ve savurgan bir şekilde tüketilmesine, bunun sonucu olarak da hızlı bir şekilde azalmasına sebep olmaktadır. Üretici ülkelerin yaptığı ambargo ile başlayan 1970’lerde ki ilk petrol krizi sonucunda, OPEC (Organization of Petroleum Exporting Countries) ülkeleri tarafından uygulanan petrol fiyatlarındaki artış, dünya ekonomisinde unutulmayacak etkilere yol açmıştır. Bu olay enerjinin ülkelerin hayatındaki vazgeçilmez yerini bir kez daha belirginleştirmiştir.

Günümüzde petrol fiyatları çok yüksektir ve her geçen gün daha da artmaktadır (Şekil 1.1). Özellikle ekonomisi yabancı kaynaklara bağlı olan ülkelerde petrol fiyatlarındaki yükselmeler hayati önem arz etmekte, fiyatlardaki düzensiz artışlar enerji piyasalarında büyük kaoslar oluşturmaktadır. Bunun sonucu oluşana belirsizlikler de ülkelerin pamuk ipliğine bağlı geleceklerini tehdit etmektedir (Anonim 2013a).



Şekil 1.1. Enerji fiyatları

Talepler doğrultusunda yerüstüne çıkarılarak kullanılan yer altı kaynakları (petrol, kömür, doğalgaz vs.); hızlı azalmanın yanı sıra, aşırı kullanılmaları sonucunda yapılarındaki C,H,S bileşenleri nedeniyle, atmosferdeki gaz dengelerini (sera gazları, asit yağmurları, ozon tabakasının tahribatı, iklim değişiklikleri) bozmakta ve yeraltında oluşan boşluklar nedeniyle de yer kabuğunda çeşitli deformasyonlara (depremlere, çökmelere) neden olmaktadır. Tüm sonuçlar, yer altı kaynaklarının kullanılmaya devam edilmesinin, yeryüzünde telafisi olmayacak tahribatlar oluşturacağını göstermektedir.

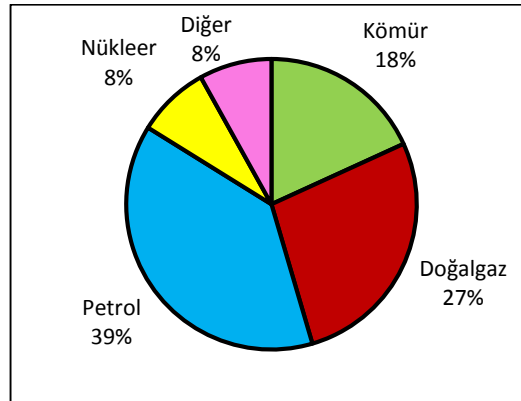
Enerji tüketim hızına paralel bir şekilde artan yakıt tüketimi seviyesi, dünya ülkelerini bir araya getirip (92. Dünya Zirvesi), bazı sınırlandırmalar (KYOTO Protokolü) yaptıracak kadar önemli seviyeye ulaşmıştır. Ülkeler, tüm dünya nüfusunu etkileyen bu tehlikenin farkına varmış ve artan emisyon miktarını azaltmak amacıyla, her geçen gün daha da katı hale getirdikleri tedbir niteliğindeki bir sürü kararı uygulamaya başlamışlardır. Bu kararlar doğrultusunda, getirilen sınırlandırmalar ve bu sınırlandırmalardaki belirgin artışlar Çizelge 1.1’de görülmektedir (Chuepeng 2011).

Çizelge 1.1. Ağır dizel motorlar için avrupa emisyon standartları

Kademe	Yıl	CO	HC	NO _x	PM	Duman	Test Metodu
		(g/kWh)				1/m	
Euro-I	1992(<85 kW)	4.5	1.1	8.0	0.612		ECE R-49
	1992(>85 kW)	4.5	1.1	8.0	0.36		ECE R-49
Euro-II	1996	4.0	1.1	7.0	0,25		ECE R-49
	1998	4.0	1.1	7.0	0.15		ECE R-49
Euro-III	2000	2.1	0.66	5.0	0.1	0.8	ESC ve ELR
Euro-IV	2005	1.5	0.46	3.5	0.02	0.5	ESC ve ELR
Euro-V	2008	1.5	0.46	2.0	0.02	0.5	ESC ve ELR
Euro-VI	2013	1.5	0.13	0.40	0.01		ESC ve ELR

1992 yılından itibaren başlayan ve emisyon salınımına büyük sınırlandırmalar getiren düzenlemeler sonucunda, fosil yakıt fiyatları da hızlı bir şekilde artmıştır. Artan yakıt fiyatlarından daha da önemli olan husus, petrol rezervlerinin hızlı azalma sonucunda gelecekte tamamen tükenme korkusu ve emisyonlardaki hızlı artış miktarıdır. Bu durum yeni yakıt teknolojilerinin veya yeni yakıt kullanımını ön plana çıkarmıştır. Özellikle fosil yakıt yerine farklı bir alternatif yakıt kullanımı kaçınılmaz olmuştur.

Fosil yakıtlar; ısınma, ulaşım, taşımacılık ve enerji üretimi alanlarında yoğun bir şekilde kullanılmaktadır. Dünya enerji kaynaklarına göre tüketim oranları incelendiği zaman petrol tüketiminin diğer kaynaklardan çok daha fazla olduğu Şekil 1.2’den görülmektedir. Petrolün; ulaşım (kara, hava, deniz), taşımacılık ve enerji üretim amaçlı olarak içten yanmalı motorlarda yoğun bir şekilde kullanıldığı bilinmektedir. İçten yanmalı motorlardaki güç-performans ilişkisi değerlendirildiğinde ise dizel motorlardaki petrol tüketiminin benzinli motorlardan daha fazla olduğu aşikârdır. Dizel motorlardan elde edilen gücün benzinli motorlardan daha fazla olması, dizel motorları ülke endüstrilerinin kalbine yerleştirmiştir. Bu nedenle dizel motor veya dizel yakıt üzerinde yapılabilecek bir iyileştirmenin, hem ekonomik hem de çevresel olarak daha etkili sonuç vereceği düşünülmektedir. Nitekim literatürde bu kapsamda yapılan çalışmaların birçoğu; dizel yakıtlara alternatif olacak şekilde yeni yakıt arayışını veya mevcut yakıtın daha verimli kullanımını kapsamaktadır. Yakıt ilavesi, yeni motor tasarımları, ateşleme sisteminde yenilikler, silindir içi teknolojileri bunlardan bir kaçıdır (Anonim 2013a).



Şekil 1.2. Dünya enerji tüketiminin birincil enerji kaynaklarına göre dağılımı

Yapılan alışmalar doğrultusunda; dizel (veya benzinli) motorlarda kullanılan mevcut yakıtlara alternatif olabilecek yeni yakıtlardan, olması beklenen özellikler genel hatlarıyla aşağıdaki gibi tanımlamaktadır (Agarwal 2007).

1. Yeni yakıt (alışma, yanma, depolama vs.) sistemi, mevcut sisteme uyumlu olmalı, büyük modifikasyonlar gerektirmemelidir. Aksi durumda kullanılan mevcut sistemlerin sayısı düşünöldüğünde, motorlardaki büyük modifikasyonların çok büyük maliyetlere neden olacağı sebebiyle, alternatif enerji kaynağı uygun olarak değerlendirilemeyecektir.
2. Alt yapı maliyetleri çok yüksek olmamalıdır. Yeni alternatif yakıtların, mevcut sistemlere uyarlanması, yüksek maliyetli sistem ve/veya alt yapı gerektirmemelidir. Aksi durumda alternatif enerji kaynağı uygun olarak değerlendirilmez.
3. Çevreye zarar vermemeli, mevcut yakıtlardan daha kirli bir yakıt olmamalıdır.
4. Kullanımı esnasında araçlara herhangi bir zarar vermemeli, aracın periyodik bakımlarında ek maliyet (yağlama yağının ömrü, aşınma vs.) çıkarmamalıdır.

Dünyadaki fosil yakıtlara alternatif enerji kaynağı araştırma çalışmalarının birçoğunda, biyo kaynaklı yakıtlar (biyokötle, biyogaz, biyodizel, alkoller, bitkisel yağlar vs.) ön plana çıkmıştır. Dr. Rudolf Diesel, 1900 yılında Dünya Sergisinde %100 fındık yağı ile çalışan bir dizel motor sergilemiş ve 1911 yılında yapmış olduğu bir açıklamasında; “dizel motorların bitkisel yağlar ile çalışabileceğini ve yakıt olarak bitkisel yağın kullanılması durumunda ölkelerin tarımlarının gelişeceğini” ifade etmiştir. 1912 yılında yapmış olduğu başka bir röportajında “motor yakıtı olarak bitkisel yağlarının kullanımı bugün önemli olmasa da, zamanla kömür ve petrol kadar önemli olacaktır” demiştir. İleri görüşlü bir insan olan Dr. Diesel’in o yıllarda önemi anlaşılmayan bu ifadeleri, günümüz dünyasının enerji rehberliğini yapmaktadır. 1900’lü yıllarda yapılan bu çalışma dizel yakıtı alternatif olarak sıvı yağ kullanımını teşvik etmiş, çalışmaları bu doğrultuda yönlendirmiştir. Sonuçta bitkisel yağ kullanımı hızla yaygınlaşmıştır. Kullanılan bitkisel yağların eşitleri, bölgesel olarak farklılık göstermektedir. Örneğin; ABD’de soya yağı, Avrupa’da ayçiçek yağı ve kolza yağı, Güney Asya’da hurma yağı, Filipinler’de fındık yağı kullanımı daha yoğundur (Agarwal 2007).

Bitkisel yağların ilk kullanımı II. Dünya savaşında ki acil durumlarda karşımıza

çıkılmaktadır. Brezilya'da ithal edilen dizel yakıt yerine, ihraç edilen pamuk yağı kullanılmıştır. Hindistan'da bireysel kullanım için 10'dan daha fazla sayıda bitkisel yağ üzerinde araştırma yapılmıştır. Japonlar ise Yomato savaş gemisinde rafine edilmiş yenilenebilir soya yağını yedek yakıt olarak kullanmışlardır (Knothe 2009).

Bitki ve sebze yağları ile ilgili ilk ulusal kongre 1982 yılında Kuzey Dakota da (ABD) yapılmıştır. Bu kongrede; bitkisel yağların motor performansı ve yağlama sistemi üzerine etkisi, fiyatı, yakıt olarak hazırlanması, özellikleri, kullanılabilecek ilaveler, yağın üretimi, yağ tohumlarının gelişimi ve elde edilmesi hakkında ki çalışmalar, fikirler beyan edilmiştir (Peterson *et al.* 1983; Ma and Hanna 1999).

Literatürde bitkisel yağların dizel motorlarda kullanım performansını içeren birçok farklı çalışma karşımıza çıkmaktadır. Yapılan bir çalışmada; kullanılmış kızartma yağının motor performansı ve emisyon değerleri analiz edilmiştir. %95 oranındaki kızartma yağı, %5 oranında ki dizel yakıtla karıştırılarak bir filo da kullanılmıştır. Sonuçta motorda herhangi bir koklaşma ve karbon birikimi olmadığı, ancak motor yağında poli-doymamış bitkisel yağın polimerizasyonuna bağlı olarak viskozitenin ve kirlenmenin arttığı tespit edilmiştir (Ma and Hanna 1999; Ramadhas *et al.* 2004)

Peterson ve arkadaşlarının 1983 yılında yapmış oldukları bir çalışmada yakıt olarak %45 yağ bileşeni ve yüksek orandaki üretim miktarı nedeniyle kış kolza yağını tercih etmişlerdir. Bu yakıtı 50/50 ve 70/30 oranlarında No 1 dizel yakıt ile karıştırmışlar, motorda ve yanma karakteristiklerindeki farklılıkları incelemişlerdir. Sonuçta; kışlık kolza yağındaki kurum oluşum miktarının, yüksek oranda (%75-85) linoleik asit içeren yağlardan yaklaşık 5 kat daha az olduğunu, %70 kışlık kolza yağı içeren 70/30 karışımının tek silindirli dizel motorda 850 saat kullanılmasına rağmen herhangi bir kurum oluşmadığını, güç değişimi ve yağlama yapısında olumsuz bir etki görülmediğini belirtilmiştir (Ma and Hanna 1999).

Bitkisel yağların kolay elde edilebilir olması, yenilenebilir olması, sıvı olması, ısı değeri dizel yakıtına yakın olması, bitkisel yağları dizel yakıtına alternatif yapmıştır. Ancak alternatif yakıt sektörüne hızlı bir giriş yapan bitkisel yağların üzerinde yapılan incelemeler sonucunda; sahip oldukları fiziko-kimyasal özellikler (yüksek viskozite, yüksek akma-bulutlanma sıcaklığı vs.) nedeniyle dizel yakıtına alternatif olamayacağını tespit edilmiştir. Özellikle uzun süreli kullanımlarda dizel motorda ciddi tahribatlara neden olmaktadır.

Pramanik (2003), yaptığı çalışmada *Jatropha Curcas* bitkisel yağını dizel yakıt ile karıştırarak dizel motorlarda kullanmış, yanma ve motor özelliklerini incelemiştir. Özellikle %70/30 oranında ki dizel/yağ karışımının viskozite değeri dizel yakıtına yakın olduğu tespit etmiş, viskozitedeki azalmanın etkisiyle egzoz gaz sıcaklığında ve yakıt tüketiminde de azalmaya neden olduğunu gözlemlemiştir. Diğer taraftan %60-70 oranında bitkisel yağ bulunan farklı bir karışım ısıtarak viskozite değeri dizel yakıtına yakın olduğu en uygun sıcaklığı 75°C olarak tespit etmiştir. Yazar çalışmada iki karışımı dizel yakıt ile karşılaştırmış; aynı viskozite değerine sahip ancak düşük oranda bitkisel yağ içeren karışımın egzoz gaz sıcaklığının, dizel yakıttan daha yüksek olduğunu tespit etmiştir.

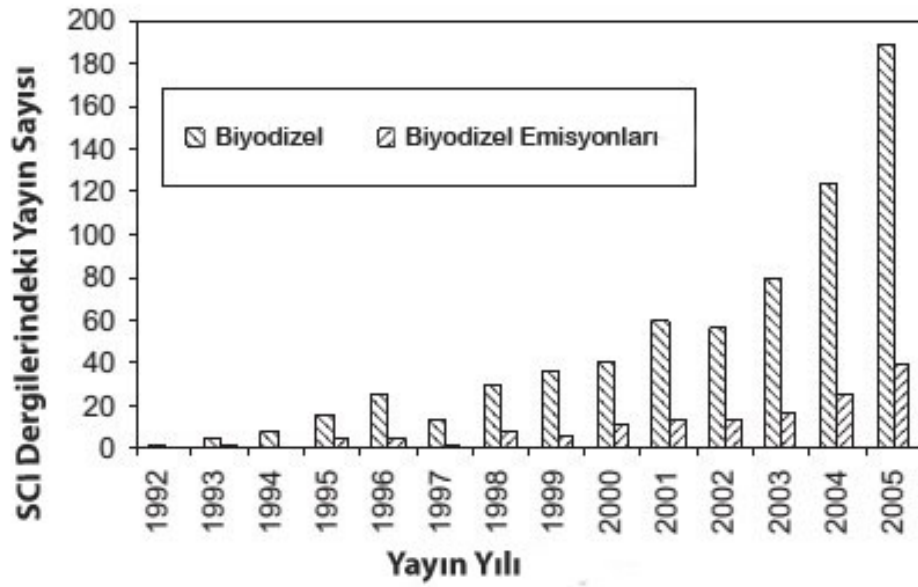
Çanakci *et al.* (2009), yapmış oldukları bir çalışmada motorlarda bitkisel yağ kullanılması yönündeki en büyük engeli aşmayı, viskoziteyi düşürmeyi hedeflemişlerdir. Bu amaçla ön ısıtmaya tabii tuttıkları saf ayçiçeği yağını motorda kullanarak sonuçları değerlendirmişlerdir. Ön ısıtma sıcaklığını, yakıtın silindir gaz basınç-ısı salınım eğrisinin dizel yakıtına çok benzediği 75°C olarak tespit etmişlerdir. Ön ısıtmalı ayçiçeği yağı, dizel yakıtına göre daha uzun tutuşma gecikmesine sahip olduğu için enjeksiyon zamanını daha önce başlatmışlardır. Kısa süreli motor testleri sonucunda elde edilen performans ve emisyon değerlerini dizel motor istatistikleriyle karşılaştırdıklarında; torkun %1,36 azaldığı, yakıt tüketiminin %5 arttığı, ısı verimin %1,06 arttığı, CO₂ değeri %2,05 azaldığı, duman miktarını %4,66 azaldığı, CO değeri %1,77 arttığını ve HC değeri %34 azaldığını tespit etmişlerdir. Bu değerler yapılan çalışmadaki farklılıkların (HC hariç) istatistiksel olarak bir öneme sahip olmadığını göstermiştir.

Bitkisel yağların sahip olduğu yüksek viskozite değerleri (dizel yakıttan yaklaşık 15-20 kat daha fazla) dizel yakıtı alternatif yakıt olmamasının önündeki en büyük engeldir. Bu engeli bertaraf etmek ve daha uygun özellikteki bir yakıt elde etmek amacıyla yürütülen bir sürü çalışmanın sonucunda gelinen son nokta; BİYODİZEL'dir.

Biyodizelin nasıl oluştuğu, bitkisel yağlardan nasıl elde edildiği, hangi aşamalardan bu noktaya geldiği Gerhard Knothe tarafından 2001 yılında yapılan bir çalışma ile ele alınmış, daha sonra aynı çalışma 2009 yılında güncellenmiştir. Knothe çalışmasında, dizel yakıtı alternatif olarak kullanılan bitkisel yağlardan, biyodizele geçişin tarihsel kronolojisini incelemiştir. Çalışmasında; 1938 yılında Walton tarafından “dizel yakıtı alternatif olan bitkisel yağların yapılarındaki trigliseridlerin parçalanması gerektiğini, yağ asitlerinin kullanılarak motorlarda kalıntı oluşumunun böylece engellenebileceği” ifadesine yer veren Knothe, biyodizel kelimesini kullanmamasına rağmen, aslında aslında günümüzdeki biyodizeli tanımlamıştır. Diğer taraftan, Belçika ve Belçika Kongosu Zaire’de yağdan gliserolün ayrılarak kullanıldığı tespit edilmiştir. Biyodizele ait ilk resmi doküman, 1937 yılında 422.877 Belçika patent numarasıyla Brussels Üniversitesi’nden G. Chavanne verilen izin de rastlanmaktadır. Bu patent, palm yağı ile asit katalizör kullanılarak elde edilen palm yağı etil esterinin dizel yakıt olarak kullanımını içermektedir. İlk testler 1938 yazında Brussels ve Leuven arasındaki yolcu otobüslerinde yapılmış ve performans sonuçları oldukça memnun edici bulunmuştur. Palm yağı etil esteri ile dizel yakıt arasındaki viskozite farkının, palm yağı ile dizel yakıt arasındaki viskozite farkından çok daha düşük olması nedeniyle etil esterlerinin dizel yakıt ile karışabileceği düşünülmüştür. Biyodizelin kronolojisinde ilk olumsuzluklar, palm yağı etil esterinin setan sayısının ölçülmesinde yaşanmıştır. Yüksek kalite standardına göre 70.5, düşük kalite standardına göre 18 olan setan sayısı, dizel yakıtlarda 50-57,5 aralığında değişirken, palm yağı etil esterinde 83 olarak tespit edilmiştir. Bu nedenle biyodizellerin setan sayısı dizel yakıttan yüksek kabul edilmiştir. 1980-1981 yıllarında yapılan birçok teknik kongrede Bruwel, metil esterlerin bitkisel yağların viskozitesinin azaltılmasında kullanılabileceğini bildirmiştir. Bu tarihten sonra biyodizel ticarileşmeye başlamıştır. İlk biyodizel terimi 1988 yılında Çin’de yayınlanan bir makalede anahtar kelimeler içerisinde yer almaktadır. Daha sonra 1991 yılında yapılan

başka bir çalışmada kullanılan biyodizel terimi, giderek yaygınlaşmıştır (Knothe 2009).

Biyodizel ile ilgili yapılan çalışmalar her geçen gün artmaktadır. Şekil 1.3’de yapılan çalışmaların yıllara göre dağılımı incelendiği zaman, yapılan çalışmalardaki hızlı artış göze çarpmaktadır (Lapuerta *et al.* 2008).



Şekil 1.3. Yıllara göre yayın dağılımı

Biyodizel bitkisel yağlardan zincirleme kimyasal prosesler sonucunda elde edilen, viskozitesi bitkisel yağlardan çok daha düşük, dizelin viskozite değerine çok yakın biyo kökenli bir yakıttır. Biyodizel, dizel yakıtla kıyaslandığı zaman birçok üstün özelliklerine (yenilebilir olması, daha düşük emisyonlara sahip olması, ayrıştırılabilir olması, zehirli olmaması, ülke ekonomisini dış bağımlılıktan kurtarması vs.) ek olarak, bazı sakıncalara da (NO_x emisyonunda artış, yakıt tüketim miktarında artış, soğukta çalışma zorluğu vs.) sahiptir. Bu sakıncalar içinde en önemlisi günümüz emisyon sınırlamaları dikkate alındığı zaman ebetteki artan NO_x emisyon değeridir. Ancak literatürdeki genel sonuçlara rağmen, özellikle emisyon değerlerinde farklı sonuçların bulunduğu (NO_x azalması, CO artması gibi) bazı çalışmalar da mevcuttur. Bu çalışmaların yüzdesel oranları incelendiği zaman göz ardı edilemeyecek kadar yüksek olduğu görülmüştür.

Lapuerta *et al.* (2008), yılında yapmış oldukları çalışmalarında; bilim dergilerinde yayınlanan biyodizel çalışmalarını ele almışlar, çalışmalardan elde edilen sonuçları gruplandırmalı olarak incelemişlerdir. Yapılan çalışmada elde edilen istatistiki veriler, Çizelge 1.2’de sunulmuştur. Çalışmalardaki motor performansı, egzoz emisyonları, PM ve düzensiz emisyonlar analiz edilmiş, aynı zamanda bu çalışmaların kendi içinde karşılaştırılması yapılmıştır (Lapuerta *et al.*2008).

Çizelge 1.2. Literatürde biyodizel kullanılan dizel motor çalışmalarının istatistikleri

Parametre	Literatürdeki Sonuçlar (%)			
	Artma	Azalma	Aynı	Yüke bağlı olarak artma-azalma
Efektif Güç (Tam Yükte)	-	96	2	2
Efektif Yakıt Tüketimi	98	-	-	2
Isıl Verim	8	4	8	80
NO _x emisyonu	85	5	-	10
PM emisyonu	3	95	-	2
THC emisyonu	1	95	1	3
CO emisyonu	2	90	1	7

Xue *et al.* (2011), biyodizel ile yapılan çalışmaların çok fazla olması ve farklı sonuçların elde edilmesi nedeniyle yapılan bu çalışmada, 2000 yılından sonra yapılmış çalışmaları kapsayan farklı bir derleme çalışması yapılmıştır. Çalışmada, biyodizelin motor gücü, ekonomisi, dayanımı, emisyonları detaylı olarak incelenmiş ve sonuçları analiz edilmiştir.

Lin *et al.* (2006), biyodizelin yakıt özelliklerini iyileştirmek, sahip olduğu negatif özellikleri pozitif çevirmek amacıyla yapılan sayısız çalışmalardan birisidir. Çalışmada, biyodizelin yakıt özelliklerini iyileştirilmesi amaçlanmıştır. Soya yağından transesterifikasyon metodu ile üretilen soya yağı metil esteri, üretimin hemen sonrasında %50 petrol eteri, %5 saf su ilave edildikten sonra ikiye ayırmış, %1 oranında hidrojen peroksit (H₂O₂) ilave edilen yarısı, herhangi bir ilave edilmeyen diğer yarı ve dizel yakıt

ile karşılaştırılmıştır. Sonuçta; biyodizele uygulanan peroksidasyon işleminin ısı değeri fazla etkilemediği, ancak bunun yanında; daha fazla sayıda doymuş karbon zincirlerinin oluşmasına neden olduğu, kinematik viskozite ve parlama noktası sıcaklığını artırdığı, yanma sonucunda daha az miktarda artık madde oluşmasına neden olduğu, peroksit değeri ve asit sayısını artırdığı, iyot değerini azalttığı, oksidasyon oranını azalttığı için peroksidasyon işleminin yakıt özelliklerini iyileştirdiği tespit etmişlerdir

Altın *et al.* (2001), yapmış oldukları çalışmada; üç farklı (ayçiçek, soya, pamuk) ham yağ ve bunların metil esterlerini, iki farklı (mısır, kolza) rafine edilmiş bitkisel yağı ve damıtılmış haşhaş yağını; motor performans ve emisyon değerleri açısından incelemiştir. Bitkisel yağların viskozite değerlerini düşürmek için 80°C ye kadar ısıtmıştır. Sonuçta; ısıtılmış bitkisel yağın motor gücünün metil esterlerden daha düşük olduğu ancak kısmen yakın olduğu tespit edilmiştir. Benzer şekilde yakıt tüketim miktarı, metil esterlerden daha yüksektir. Bitkisel yağ ve metil esterlerin emisyon değerlerine bakıldığında; CO ve duman miktarının arttığı ancak NO_x ve CO₂ miktarının azaldığı tespit edilmiştir. Ancak ısıtılmış bitkisel yağlarda CO ve duman miktarı metil esterlere göre daha fazla, NO_x ve CO₂ emisyonları ise daha azdır. Sonuçlar değerlendirildiğinde de metil esterlerin dizel yakıtı daha benzer olduğu tespit edilmiştir.

Knothe *et al.* (2003), yapılan çalışmada biyodizel üretimi sonucunda elde edilen dallanmış yağ asitlerinin setan sayısı üzerine etkisini incelemiştir. Bu amaçla 8 farklı çeşit esterdeki 29 yağ asidinin setan sayısını IQT ile incelemişler ve sonuçta dallanmış yapının setan sayısı üzerinde etkisinin fazla olmadığını, ancak soğuk akış özelliğini iyileştirdiği tespit etmişlerdir. Ayrıca dallanmış alkollerden elde edilen yağ esterlerinin düşük sıcaklık özelliğinin, düz zincirli alkolden elde edilen esterden daha iyi olduğunu bulmuşlardır.

Knothe (2005), yapmış olduğu çalışmada biyodizeldeki yağ asit ester miktarının ve kullanılan alkol oranının, biyodizelin fiziksel ve kimyasal/yanma özelliklerine etkisini incelemiştir. Bu kapsamda; setan sayısı, emisyonlar, soğuk akma, oksidasyon kararlılığı, viskozite ve yağlama özelliklerini incelenmiştir. Sonuçta; setan sayısı, yanma ısısı, erime

noktası sıcaklığı ve viskozite değerinin, zincir uzunluğunun artmasıyla arttığı ve doymamışlığın artmasıyla azaldığını tespit etmiştir. Ayrıca çalışma, belirli yakıt özelliklerinin nasıl bir kimyasal yapı ile elde edilebileceğini göstermektedir.

Dunn (2005), yapılan çalışmada biyodizelin depolama esnasında oluşan oksidasyon kararlılığını gösteren oil stability index (OSI) ile iyot değeri arasındaki hassasiyeti incelemiştir. Bu amaçla depolama ve ambalajlama şartları farklı olan beş farklı kaynaktan temin ettiği soya yağı metil esterlerini kullanmıştır. Sonuç olarak, depolamaya bağlı olarak oluşan oksidasyonun, ilk kademelerde ki etkisinin tanımlanmasında, OSI değerinin iyot değeri tanımlamasından daha hassas olduğunu göstermiştir.

Knothe and Steidley (2007), yapılan çalışmada, biyodizelin içinde bulunan yağ asitlerinin viskoziteye etkisi incelenmiştir. Her bir yağ asidinin viskozitesi ayrı ayrı hesaplanarak, kinematik viskozite değerinin zincir uzunluğuna (alipatik hidrokarbonlardaki veya yağ esterlerindeki alkol miktarı ile yağ asitlerinden kaynaklan) etkisi incelenmişlerdir. Sonuçta; (1) belirli sayının üzerindeki karbonların kinematik viskozitedeki artış miktarı, yağ bileşenleri ile kıyaslanınca alipatik hidrokarbonlarda daha düşüktür. (2) Doymamış yağ bileşenlerinin kinematik viskozitesi, çift bağların sayısına ve yapısına kuvvetli bir şekilde bağlı iken, pozisyonuna çok az bağlıdır. (3) Hidroksil grubu bileşenler veya yağ asitleri viskoziteyi artırır. (4) Yağ bileşenlerinin viskozite değeri, dizeldaki çeşitli hidrokarbonlarınkinden daha büyüktür

Nascimento *et al.* (2008), yapılan çalışmalarında; dizel, biyodizel ve bunların karışımlarının yakıt olarak kullanıldığı 30 kW mikro-türbin dizel motorunun tam yük ve kısmi yüklerde çalıştırılması durumunda elde ettiklerini emisyon ve performans değerlerini, “Gate Cycle GE Enter” yazılım programını kullanarak simüle ettikleri çevrim değerleri ile karşılaştırmışlardır. Kısa süreli yapmış oldukları deney sonucunda; deneysel işlemlerde elde edilen biyodizel ve karışım performans değerlerinin, dizel yakıtı yakın olduğu, emisyon değerlerinde ise, CO emisyon miktarının arttığı ve NO değerinin azaldığı tespit edilmiştir. Performans sonuçları simülasyon sonuçları ile yakındır. Ancak daha hassas çalışma yapılabilmesi daha fazla simüle şartına ihtiyaç vardır.

Haşimoğlu *et al.* (2008), yapmış oldukları çalışmalarında; biyodizelin motor performans değerlerini iyileştirmek için turbo şarjlı, direk enjeksiyonlu bir dizel motorda bazı kısımlara (piston, silindir başı, silindir kenarı, egzoz supabı) termal duvar kaplaması yaparak, düşük ısı kayıplı LHR (Low Heat Rejection) motoru elde etmişler, bu motorda biyodizeli kullanarak motor performans değerlerini dizel ile karşılaştırmışlardır. Karşılaştırmalarda kaplama yapılmadan önceki motor verimini kullanmışlardır. Sonuçta LHR motorun standart motora göre sahip olduğu özellikler (1. Ateşleme gecikme periyodu kısalmış, 2. Ön karışımli yanma periyodu kısalmışken difüzyon yanma periyodu artmış, 3. Toplam yanma süresi artmış, 4. Difüzyon yanma periyodundaki ısı salınım oranı azalmış) nedeniyle; motor gücünün, torkunun ve termal veriminin arttığını tespit etmişlerdir.

Karhale *et al.* (2008), yapmış oldukları çalışmalarında; dizel yakıt ile hacimsel olarak %20, %40,%60 oranlarında karışım hazırladıkları Karanja yağı metil esterini, belirli sıcaklıklarda ısıtmış, her bir numuneyi iki farklı enjeksiyon basınç değerinde (180 kg/cm² ve 245 kg/cm²) kullanmış ve elde etmiş oldukları sonuçları dizel yakıt ile karşılaştırmışlardır. Sonuçta hem yakıt ısıtılmasının hem de enjeksiyon basıncındaki artışın, motor performansını olumsuz etkilediği tespit etmişlerdir.

He *et al.* (2009), yapmış oldukları çalışmalarında; dört silindirli, turbo şarjlı ve direk enjeksiyonlu bir dizel motorunda kullandığı soya yağı biyodizelinin egzoz gazını analiz etmişler ve egzozdaki karbonlu bileşenleri incelenmişlerdir. Çalışmada, motorun 8 farklı yükleme (2300 dev/dak devir sayısı için %100-75-50-10, 1200 dev/dak devir sayısı için %100-75-50 ve jikle devri) durumu için optimum sonuç elde etmiştir. Sonuçta biyodizel kullanımı ile karbonlu bileşenlerde dizel yakıtla oranla yaklaşık üç kat artış olduğu ve motor yükünün azalması ile karbonlu bileşenlerin çok az azaldığı tespit edilmiştir.

Sahoo *et al.* (2009), yapmış olduğu çalışmada; üç çeşit (jatropha, karanja ve polanga) bitkisel yağ kullanılarak elde edilen metil esterlerini (B100), bu esterlerin dizel yakıt ile farklı karışım oranlarını (B20, B50) ve dizel yakıtı kullanılmışlardır. Deneyleri üç farklı devirde (1200-1800-2200 dev/dak) yapılmış ve üç silindirli traktör motoru kullanmıştır. Çalışma sonuçları; biyodizel ve karışımlarının, dizel yakıtla arasındaki farklar

incelenerek sunulmuştur. Sonuçta; transesterifikasyon metodunu kullanarak elde edilen biyodizelin karakteristik özelliklerinin, dizel yakıtı çok benzediği tespit edilmiştir. Tam yükteki motor performans testlerinde (1200-1400 dev/dak için), güç kaybındaki değişimin önemli olmadığı ve yakıt tüketiminin devrin artmasıyla azaldığı, karışımdaki biyodizel oranının artmasıyla arttığı tespit edilmiştir. Duman miktarı biyodizel ve karışımlarında azalmaktadır. Tam yükte duman miktarı, karışım ve devir ile azalmaktadır. Kısmi yüklerde ise, JB20, KB20 ve PB50 değerleri için yakıt ekonomisinde gelişme vardır. En iyi yakıt ekonomisi, JB20 de görülmektedir. Efektif yakıt tüketiminin azaltılması için karışımdaki biyodizel oranının %20 den yüksek olması gerekmektedir. Dizel içindeki biyodizel oranının daha yüksek olduğu kısmi yüklerde, egzoz dumanı azalma eğilimindedir. Ayrıca biyodizel ve karışım kullanıldığı zaman HC ve PM miktarı azalır. Buna karşın, CO, NO_x ve NO_x-HC kombinasyonu miktarı artmaktadır.

Wu *et al.* (2009), yapmış oldukları bir çalışmada; birisi atık pişirme yağı olan beş farklı (soya, kanola, pamuk, hurma) bitkisel yağı kullanarak elde ettiği metil esterlerine ait egzoz emisyon değerlerini (PM, kuru is, NO_x, HC ve CO) incelemiş, bu parametrelerin yakıtın hangi özelliği ile değişebileceğini ifade etmiştir. Çalışmaları sonucunda; biyodizel kullanılması ile PM ve is emisyonlarının azaldığını, NO_x emisyonlarının arttığını tespit etmiştir. Yazara göre; aynı oksijen bileşenine sahip biyodizel yakıtlarda, daha yüksek setan sayısına sahip olan yakıtın daha düşük NO_x ürettiği ayrıca HC ve CO emisyonlarının da azaldığı tespit edilmiştir. Her iki parametredeki azalmayı; oksijen bileşeni ve setan sayısının etkisi ile açıklamıştır.

Jain and Sharma (2010), yapmış oldukları çalışmada; biyodizelin üretimden sonra depolanması durumunda, özellikle uzun süreli depolanma sonucunda fiziksel ve kimyasal özelliklerindeki değişimleri incelemiştir. Yakıt kararlılığı, yanma kalitesi ve motor ekipmanları sorunsuz çalışması açısından önemli bir parametredir. Bu çalışmada depolamadan kaynaklanan kararsızlıklar (oksidasyon, depolama ve ısı kararsızlık) ve bu kararsızlıkların yakıtın hangi özelliğini, nasıl etkilediği incelenmiştir. Sonuçta; iyot sayısının, doymuş asitler ve doymamış asitler arasındaki ilişkisine bakıldığında, her iki asit çeşidinde de aynı oranda etkili olduğunu tespit edilmiştir. Ayrıca kararsızlıkların

giderilmesi amacıyla kullanılan antioksidanlar grubundan doğal antioksidanların, biyodizel üretim tekniklerinden etkilendiğini ve damıtma işleminin yakıt kararlılığı üzerinde çok etkili olduğunu tespit etmişlerdir.

Biyodizel, dizel yakıtı alternatif olarak kullanılmasını sağlayan avantajları nedeniyle hem mevcut avantajların detaylandırılması hem de biyodizele yeni üstün özelliklerin kazandırılması amacıyla günümüze kadar birçok çalışmaya konu olmuştur. Ayrıca bu çalışmaların derlendiği (review) çalışma sayısı da ihmal edilemeyecek kadar çoktur. Bunlardan bir kaçını inceleyim:

- Ma and Hanna (1999), çalışmalarında biyodizel üretimini, üretim yöntemlerini ve üretime etki eden parametreleri detaylı olarak incelemiş, yapılan çalışmaları ve sonuçları karşılaştırmalı olarak analiz etmişlerdir.
- Srivastava and Prasad (2000); çalışmalarında Hindistan için önemli bir enerji kaynağı olan dizel yakıtı (yaklaşık tüm enerji kaynakları içinde %43,2 kullanım oranına sahip) alternatif olabilecek yakıtları (bitkisel yağları ve biyodizeli) incelemişlerdir. Çalışmada biyodizelin üretim yöntemleri, üretimi etkileyen parametreleri ve etkileri anlatılmıştır.
- Ramadhas *et al.* (2004), farklı ülkelerde yapılan farklı çalışmaları incelemiş, bitkisel yağların ve esterlerinin kullanılması durumundaki motor performansını, egzoz emisyonlarını karşılaştırmıştır. Bitkisel yağların daha yüksek partikül emisyonu nedeniyle dizel yakıt olarak kullanılmayacağını, fakat gelecekte bitkisel yağların dizel yakıtlara alternatif olacağını belirtilmiştir.
- Gerpen (2005), çalışmasında artan biyodizel üretiminin, Birleşmiş Devletler için önemini incelemiştir. Biyodizel üretiminin detaylı olarak incelendiği çalışmada, imal edilen biyodizelin hammadde olarak kullanıldığı soya yağı ve atık kızartma yağlarının enerji sektöründeki yeri ve önemini analiz edilmiştir.
- Agarwal (2007), yapmış olduğu çalışmasında hem etanol hem de biyodizel yakıtının kullanımını içeren bir derleme hazırlamıştır. Çalışmasında her iki yakıtın da (etanolün dizel ile karıştırılarak kullanılması ve biyodizelin özellikle %20 oranında dizel ile kullanılması durumundaki) motor performans ve emisyon analizlerini detaylı olarak incelemiştir.
- Chuepeng (2011), yapmış olduğu bir çalışmada biyodizelin içten yanmalı motorlarda

kullanımı ile ilgili mevcut çalışmaları analiz ederek özellikle yeni teknolojiye sahip içten yanmalı motorlarda biyodizel kullanımın etkilerini incelemiştir.

Ceviz and Yüksel (2006), yapmış oldukları çalışmada benzinli motorundaki çevrimsel farkları incelemek amacıyla LPG yakıtını kullanmışlar ve sonuçları benzin yakıtı ile karşılaştırmışlardır. 1800 dev/dak devir sayısında yapmış oldukları çalışmada, benzin motorundaki LPG ve benzin yakıtına ait çevrimsel farkları incelemiştir. Sonuçta LPG yakıtının fakir yanma şartlarında benzinli yakıttan daha iyi olduğunu tespit etmişlerdir.

Wu and Chen (2006), çalışmalarında Wavelet analiz metodunu motorlardaki hata sinyallerinin tespit işleminde kullanmışlardır. Çalışmalarında; sürekli dalgacık dönüşüm algoritmasını kullanarak içten yanmalı motorlarda oluşan hata sinyallerini analiz etmişlerdir. Makinalarda hata tespiti için ses, emisyon sinyalleri ve mekanik titreşimin kullanımı, dijital sinyal işleme prosesi ve uygulama tekniklerinden dolayı oldukça önemlidir. Bu nedenle içten yanmalı motorlarda ve soğutma sistemindeki hatalı sinyalleri tespitini yapmak amacıyla sürekli dalgacık dönüşüm işlemini uygulanmış, sonuçta sürekli dalgacık metodunun her iki durumun hatalı sinyallerinin tespitinde etkili olduğu tespit edilmiştir.

Sen *et al.* (2008a), yapılan çalışmada, içten yanmalı, dört zamanlı, tek silindirli Aprilia/Rotax marka benzinli motorda yanma sonucu oluşan silindir basınç değerlerindeki değişimi ele almışlar bu farklılıkları Wavelet Analiz metoduyla incelemiştir. Analiz işlemi için sürekli dalgacık metodu kullanılmış ve ana dalgacık olarak $\omega_0 = 6$ olan Morlet dalga modeli seçilmiştir. Yapılan çalışma sonucunda; basınç sinyallerinin dalga güç spektrumundan, çoğu uzun olan orta ve kısa periyodiklikler tanımlandı. Motor 0, 10, 20, 28, 40 ve 43 Nm tork değerlerinde çalıştırılarak elde edilen ilk 960 çevrimdeki Pmax değerlerinin çevrimsel farklılıklarının zaman serileri kullanıldı. Bu verilere sürekli dalgacık analiz metodu uygulandı.

Sen *et al.* (2008b), yapılan çalışmada dizel motordaki ortalama indike basınç

değerlerindeki değişimi Wavelet Analiz metodu kullanarak incelemişlerdir. Deneylerde direk enjeksiyonlu, 3 silindirli bir dizel motoru tam yükte 1000-1200-1400-1600-1800-2000 dev/dak devir sayısında kullanarak MIP değerlerinden oluşan zaman dizilerini kullanmışlardır. Çalışma sonucunda; silindirlerdeki basınç değişiminin motor devrine bağımlı olduğu, 1200 dev/dak ve 200 dev/dak devir sayılarında güçlü periyodik (diğer devir sayılarındaki periyodiklik aralıklıdır) nedeniyle tespit etmişlerdir.

Asok K Sen tarafından Wavelet Analiz metodu kullanılarak yapılan farklı çalışmalara da bulunmaktadır. Örneğin;

- Sen *et al.* (2009), Güney Kutup Denizindeki paleoproductivity değerlerinin analizini,
- Sen *et al.* (2010), fakir yanma şartlarındaki doğalgaz motorundaki basınç dalgalanmalarının analizini,
- Sen *et al.* (2011a), bir benzinli motorda kullanılan doğal gaz yakıtı ile oluşan çevrimsel farklardaki dinamikleri,
- Sen *et al.* (2011b), doğalgazla çalışan bir benzin motorundaki EGR kullanımının çevrimsel farklar üzerine etkisini incelemiştir.

Ceviz *et al.* (2012), yapılan çalışmada benzinli bir motorda benzin-hava karışımına ilave ettikleri hidrojenin etkisini, motor karakteristikleri ve emisyon parametreleri üzerinde incelemişlerdir. Yakıt-hava oranları stokiyometrikten çok fakire doğru değişmekte olup, değişken hacim oranlarında (%2.14, 5.28 ve 7.74) hidrojen ilave ettikleri yakıt hava karışımının sonuçlarını, hidrojen ilave edilmeden yakılan karışım sonuçları ile karşılaştırmışlardır. 2000 dev/dak da 1000 sıralı motor çevriminin inceledikleri bu çalışmada, motorun çevrimsel farkları Wavelet Analiz metodu kullanılarak analiz edilmiş ve en optimum karışım seçilmiştir.

Zhang and Moore (2011), yapmış oldukları çalışmalarında dalgacık güç spektrasında koni etkisini incelemiştir. Yapılan çalışmada Baltık denizine ait 300 yıllık buz kalınlık verilerinin oluşturduğu zaman dizilerini kullanarak elde ettiği dalgacık güç spektrumunda koni etkisiyle tanımlanan bölgenin güvenilir olup olmadığını analiz etmiştir.

2. KURAMSAL TEMELLER

2.1. İçten Yanmalı Motorlar

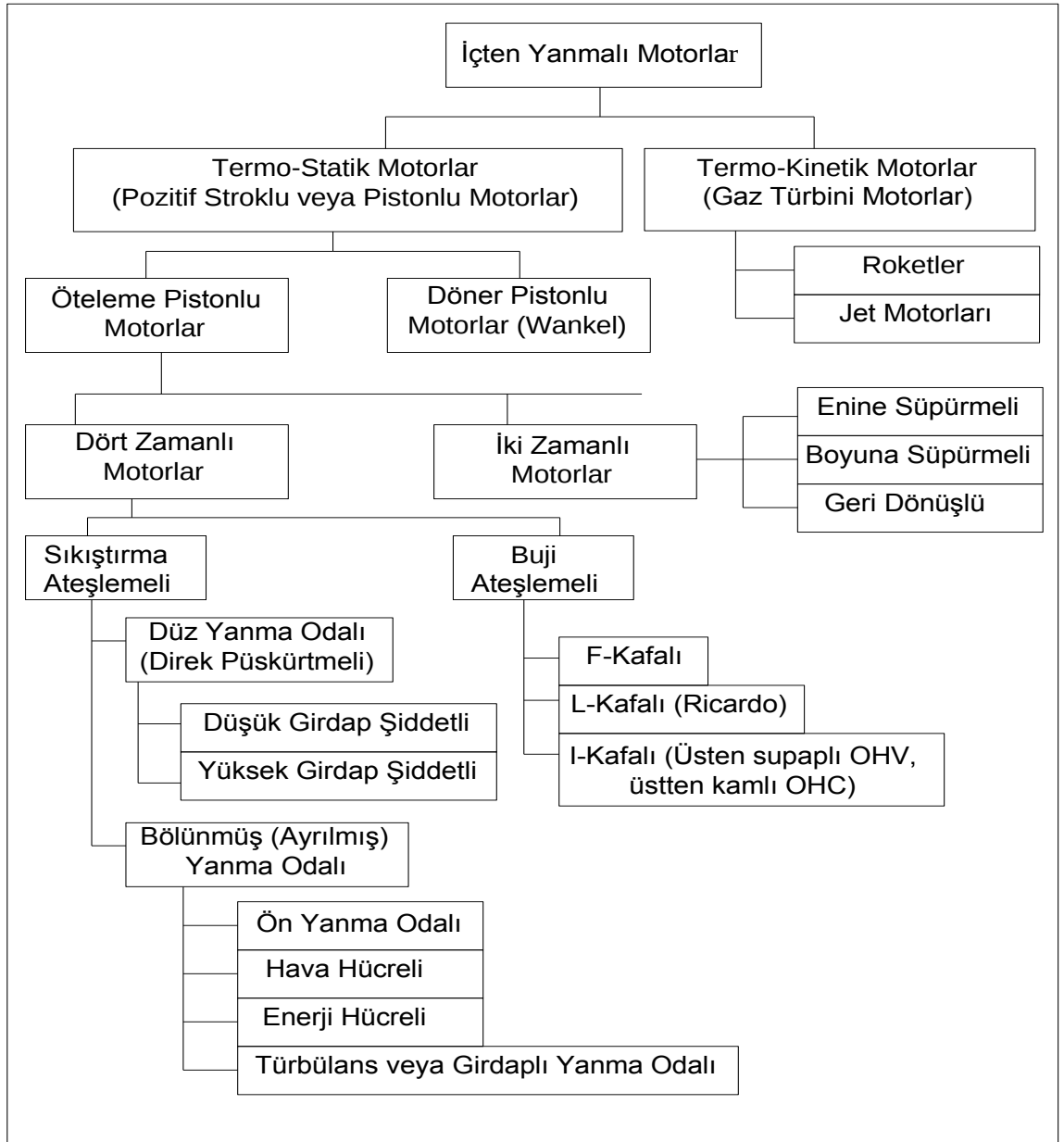
Yakıtın kimyasal enerjisini mekanik enerjiye dönüştüren makinelere motor denir. Enerji dönüşüm şekline göre motorlar, içten yanmalı motorlar ve dıştan yanmalı motorlar olarak sınıflandırılır. Yanma olayı motor içinde gerçekleşir ve yanma sonucunda elde edilen gazlar iş yapımında kullanılırsa; İçten Yanmalı Motor (İYM), yanma olayı motor dışında gerçekleşir ve yanma sonucunda elde edilen gazların enerjisi (genellikle bir eşanjör aracılığıyla) taşınıyorsa Dıştan Yanmalı Motor (DYM) olarak sınıflandırılır (Safgönül vd 2008).

İYM'lar; sadelik, dayanım ve yüksek güç/ağırlık oranına sahip olması nedeniyle, taşımacılık (kara, hava ve deniz) sektöründe, güç üretiminde, elektrik üretiminde, tarım aletlerinde, yer altı maden sektöründe aktif olarak kullanılmaktadırlar. 1860'lara kadar İYM'larda, kömür gazı ile hava karıştırıldığı ve atmosfer basıncında yakılarak kullanıldığı için pratik olarak elverişli değillerdir. J.J.E. Lenoir ilk defa gaz yakıt ile havayı karıştırarak kullandı. Bu motorlarda piston strokunun yarım çevriminde; silindir içine karışım alındı, basıncı artırıldı, buji ile ateşleme yapıldı ve ikinci yarım çevriminde ise atık gazları dışarı atılarak çevrim tamamladı. Bu motor 6 Hp gücünde ve yaklaşık %6 verimle çalışıyordu. Nicolas August Otto ve Eugen Langen 1867 de silindir içerisinde vakum üretmek için şasi montajı yaparak, yanma sonrasındaki basıncı artırdılar. Verimi %11 olan bu motorun, ağırlığının çok fazla olması ve diğer dezavantajları (büyük strok, büyük sıkıştırma oranı vs.) nedeniyle N.A. Otto çalışmalarını, bu dezavantajları gidermek yönünde yürüttü ve 1876 da daha hafif, dört zamanlı, benzinle çalışan günümüzdeki buji ateşlemeli motorunu üretti. Daha düşük vuruntu oranına, daha yüksek verime sahip bir motor elde etmek amacıyla çalışmalara başlayan Alman mühendis Rudolf Diesel ise; 1892 yılında sıkıştırmış olduğu havanın üzerine yakıt püskürterek yanmayı sağladı ve böylece yeni bir motor elde etmiş oldu. Ancak bilinen dizel motor teknolojisini elde etmesi onun 5 yılını aldı. Otto tarafından üretilen buji ateşlemeli içten yanmalı (benzinli)

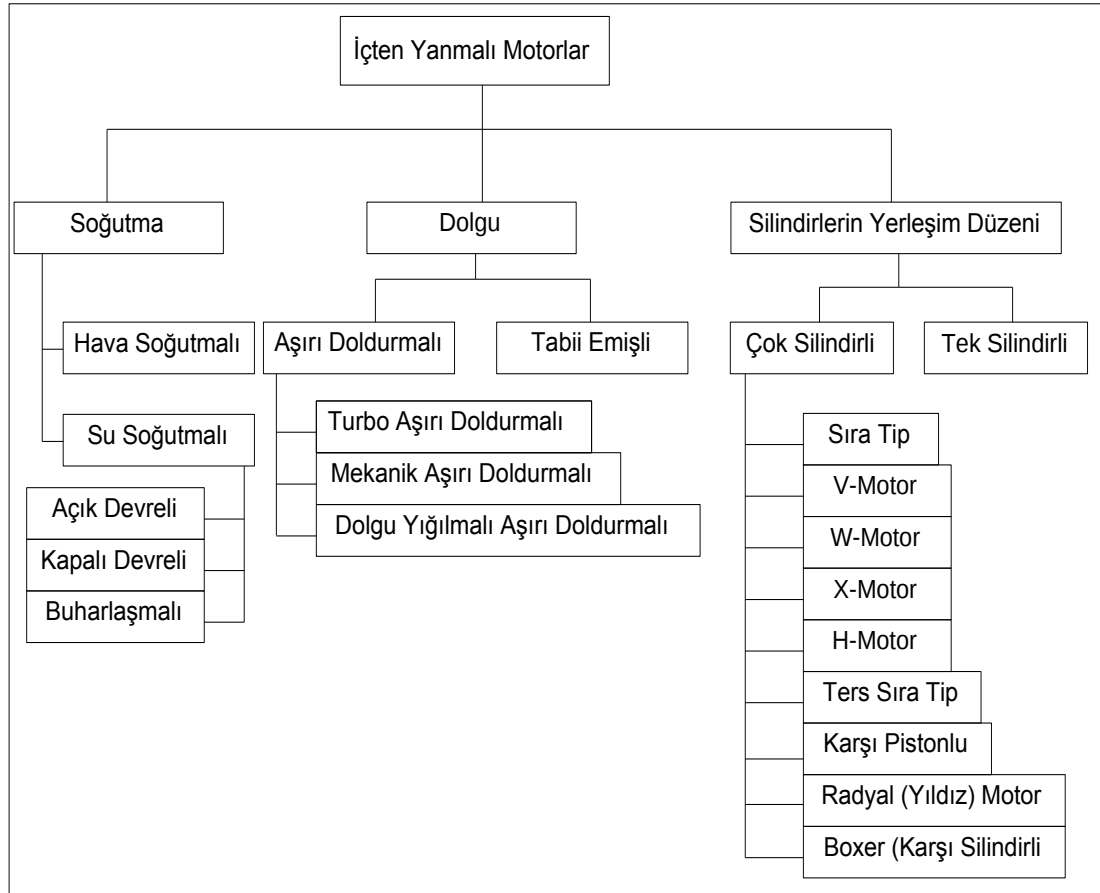
motorların ve Diesel tarafından üretilen sıkıştırılmalı ateşlemeli içten yanmalı (dizel) motorların icadından sonra; yakıt, motor tasarımı, çalışma parametreleri üzerinde sayısız çalışma yapıldı (Heywood 1988).

Dizel motorun icat edilmesi ve gelişimi ile ilgili yapılan çalışmalar incelendiğinde, Bryant'ın 1976 yılında Rudolf Diesel tarafından yazılan dört kitabın analizini içeren çalışma karşımıza çıkmaktadır. Yazar çalışmasında, hayatımızın vazgeçilmez bir parçası olan dizel motorunun, Rudolf Diesel (1858-1913) tarafından icat edilme aşamalarını ve bu dönemde yaşadığı zorlukları incelemiştir. R. Diesel'in 1913 yılında beklenmedik ölümünden hemen sonra yayınlanan üç kitabı ve ölümünden hemen önce yayınlanan bir kitabını referans alarak hazırlanan çalışmada; o günün teknolojisini, icat yapmanın zorluklarını, bir icat yapılırken karşılaşılabilecek olumlu/olumsuz durumları ve dizel motorun zaman içinde nasıl geliştiğine yer vermiştir (Bryant 1976).

İYM'ların en önemli iki dezavantajı; (1) yanma veriminin çok düşük olması, (benzinlide %30-37, dizelde %35-50) (2) egzoz emisyon değerlerinin çok yüksek olmasıdır. Şimdiye kadar yapılan çalışmaların büyük bir kısmında ya yanma veriminin artırılması veya egzoz emisyon değerlerinin azaltılması hedeflenmiştir. Bu hedef doğrultusunda mekanik aksam, çalışma sistemi, yakıt çeşidi vs. içeren birçok yenilik elde edilmiş ve İYM'lar her geçen gün gelişmiştir. Yapılan çalışmalardaki bu çeşitlilikler, İYM'lara farklı nitelik kazandırmış ve onları farklı sınıflarda inceleme olanağı sunmuştur. İYM'ların çeşitli parametrelere göre sınıflandırılması Şekil 2.1'de ve Şekil 2.2'de görülmektedir (Öz vd 2003).



Şekil 2.1. İçten yanmalı motorların sınıflandırılması



Şekil 2.2. İçten yanmalı motorların sınıflandırılması

2.1.1. Yakıtların fiziko-kimyasal özellikleri

İYM’larda en fazla kullanılan yakıtlar, benzin veya dizel yakıtıdır. Bu yakıtlar ham petrolün rafinasyonundan elde edilen, birçok hidrokarbonun karışımından oluşmaktadırlar. Karbon ve hidrojenlerden oluşan hidrokarbonların yakıt içerisindeki genel dağılımı %86 karbon, %14 hidrojen (dizel yakıtlarda yaklaşık %1 oranında sülfür) şeklindedir. Benzin ve dizel yakıtın dışında, oksijen içeren alkoller, doğalgaz, LPG, tek hidrokarbon bileşeni (metan, propan, iso-oktan) gibi yakıtlarda İYM’larda denenmiştir (Heywood 1988).

Benzin ve dizel; parafin, naften, olefin ve aromatiklerden oluşan hidrokarbonların karışımıdır. Her bir hidrokarbon karakteristik karbon-hidrojen zincir yapısına ve kimyasal formüle sahiptir (Srivastava and Prasad 2000; Ferguson and Kirkpatrick 2001).

Parafinler; genel formülleri C_nH_{2n+2} olup, doymuş hidrokarbonlardır. Hidrojen sayısı fazla olduğu için ısı değerleri büyük, yoğunlukları düşüktür. Karbon atomları birbirlerine tek zincirle, kalan zincirler ise hidrojenle bağ kurduğu için çift zincir veya üçlü zincir ihtiva etmezler. Bu nedenle doymuş hidrokarbonlardır. Zincirlerin yapısına göre *normal-parafinler* (düz zincirli) ve *izo-parafinler* (dallanmış zincirli) olmak üzere iki gruba ayrılır. Kimyasal yapıdaki karbon atomunun sayısı (1:*meth*, 2:*eth*, 3:*prop*, 4:*but*, 5:*pent*, 6:*hex*, 7:*hept*, 8:*oct*, 9:*non*, 10:*dec*, 11:*undec*, 12:*dodec*) ön ek olurken, normal parafinler için *-ane* son eki getirilerek isimlendirilirler. Örneğin; CH_4 -methane, C_4H_{10} -butane, C_8H_{18} -octane vs. İzo-parafinlerde bu isimlendirme, dallanmanın olduğu yeri göstererek yapılır. Örneğin; dallanmış yapıdaki C_8H_{18} hidrokarbonu, 2.2.4-Trimethyl Pental olarak isimlendirilir ve beş tane karbon atomuna üç tane metil (CH_3) bağlandığını tanımlarken 2.2.4 sayıları da bu metil grubunun, beş karbon atomundan hangi atomlara bağlandığını gösterir. Normal parafinler kolay parçalanabildikleri için tutuşma meyilleri yüksektir. Bu nedenle benzin motoru yakıtı olarak uygun değildirler. Buna rağmen izo-parafinler tutuşma meyilleri düşüktür. Bu nedenle vuruntu meyilleri azdır ve benzin motor yakıtı için çok uygundur (Ferguson and Kirkpatrick 2001; Safgönül vd 2008).

Naftenler; genel formülü C_nH_{2n} olan, yapısında çift zincir veya üçlü zincir bulunmayan doymuş hidrokarbonlardır. Yapılarında hidrojen miktarı az olduğu için ısı değerleri düşük, yoğunlukları fazladır. Isı değerleri parafinlerden düşük, aromatlardan yüksektir. Atom dizilişi olarak halka yapıya sahip oldukları için *cyclo* ön eki ve *-ane* son eki getirilerek (C_7H_{14} ; cyclo-hexane) isimlendirilir. Halka yapı parçalanmaları zorlaştırdığı için tutuşma meyilleri normal parafinlerden daha az, izo-parafinlerden fazladır. Hem benzin hem dizel yakıtı olarak kullanımı uygundur (Ferguson and Kirkpatrick 2001; Safgönül vd 2008).

Olefinler; yapısında çift bağların bulunduğu doymamış hidrokarbondur. Çift bağ sayısı bir adet ise *mono-olefin* (C_nH_{2n}), iki adet ise *di-olefin* (C_nH_{2n-2}) olarak gruplandırılırlar. Isıl değerleri düşük ve tutuşma meyilleri azdır. Parafinler kadar kolay parçalanmadığı için benzin yakıtı olarak kullanılabilir.

Aromatlar; sahip oldukları keskin kokuları nedeniyle bu ismi almışlardır. Genel formülleri C_nH_{2n-6} olup, yapılarında çok sayıda çift bağlı karbon atomu bulundurulur. Isıl değerleri düşük, yoğunlukları yüksektir. Halka şeklinde dizilirler, tutuşma meyilleri düşüktür. Genellikle kömürden yapay olarak elde edilen, benzinin oktan sayısını artırmak (böylece vuruntu mukavemetini artırmak) amacıyla katkı maddesi olarak kullanılırlar. En genel aromattir benzendir. Ancak kanserojen etkisinin yüksek olması nedeniyle kullanım miktarı sınırlıdır. Benzin motoru için uygun bir yakıt çeşididir. Toluene, etilbenzen, styren gibi bazı aromatlarda, hidrojenin yerine metil radikali gibi gruplara sahip iken diğer aromatlarda (biphenyl) birden fazla gruba sahiptir. Poliaromatik hidrokarbonlar (PAH) ise, iki karbon atomunu bir halkadan daha fazla grupta paylaşırlar (Ferguson and Kirkpatrick 2001; Safgönül vd 2008).

Bu çalışmanın amacı dizel motorda kullanılmak amacıyla dizel yakıtı alternatif olabilecek bir yakıt araştırması yapmak ve sonuçları dizel yakıt ile mukayese etmektir. Bu nedenle İYM yakıtlarının özellikleri kapsamında, sadece dizel yakıtlar ayırt edici özellikleri (setan sayısı, tutuşma meyli, viskozite, atomizasyon vs.) incelenecek, benzin yakıtlarına ait özellikler (oktan sayısı, uçuculuk vs.) incelenmeyecektir.

Dizel motorların hız kapasitesine göre (yüksek hızlı:1 ve 1D, orta hızlı:2 ve 2D, düşük hızlı:4 ve 4D) tanımlanan yakıt özellikleri Çizelge 2.1’de sunulmuştur (Öz vd 2003).

Çizelge 2.1. ASTM D975 Dizel motorlarında kullanılan yakıt özellikleri

İstenilen Özellik	Yüksek Hızlı		Orta Hızlı		Düşük Hızlı	
	1	1D	2	2D	4	4D
Setan Sayısı, min	-	40	-	40	-	30
Parlama Nok., min (°C)	38	38	38	52	55	55
Akma Nok., max (°C)	-18	-	-7	-	-	-
Viskozite, min-max, 37,78 (°C)	30-34	30-34	33-38	33-45	45-125	45-125
API, min	35	-	30	-	-	-
ASTM damıtımı						
%10 max (°C)	215,55	-	282-338	-	-	-
%90 max (°C)	288	288	-	282-357	-	-
%10 artık içindeki						
c (%w)	0.15	0.15	0.35	0.35	-	-
Kül (%w)	-	0,01	-	0,02	0,10	0,10
Su+Tortu (%vol)	eser	eser	0,10	0,10	0,50	0,50
Kükürt (%w)	-	0,50	-	1,0	-	2,0

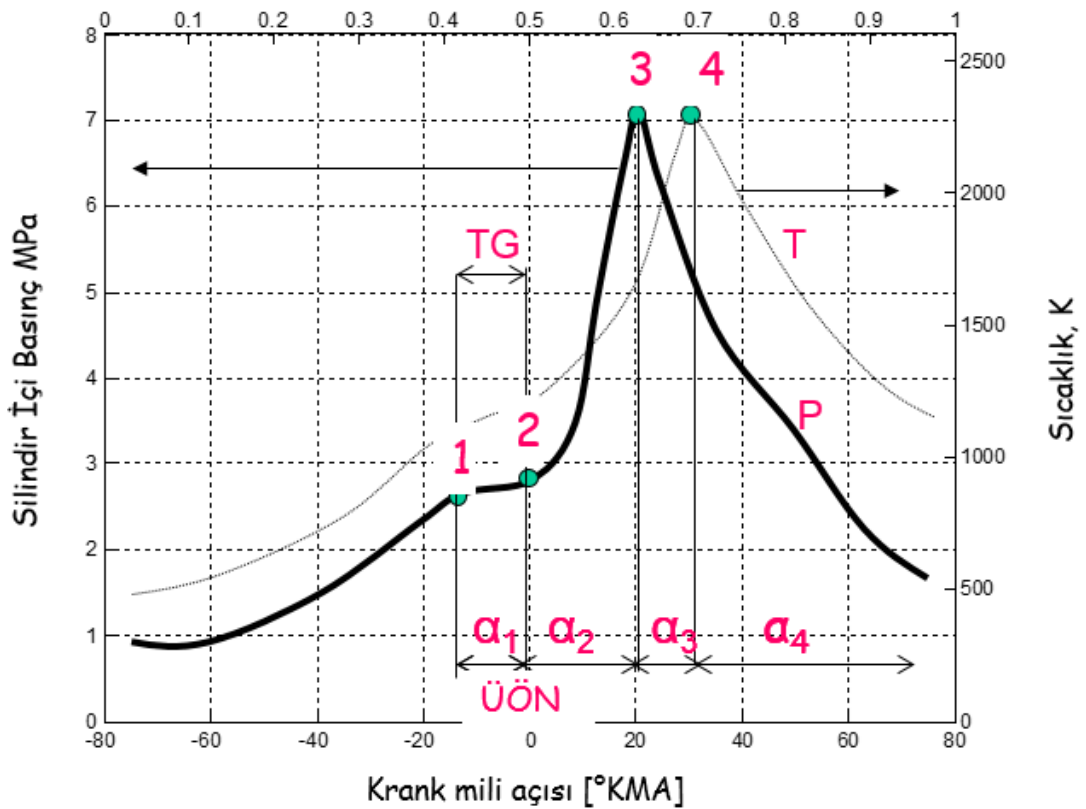
2.1.1.a. Tutuşma meyli

Dizel motorlarda sıkıştırılan havanın içine gönderilen yakıtın uygun şartlarda (basınç ve sıcaklık) yanabilme özelliğine tutuşma meyli denir. Vuruntu nedeniyle bu değerin dizel yakıtlarda yüksek, benzinli yakıtlarda düşük olması istenir. Tutuşma meylinin düşük olması, TG zamanının artmasına ve kontrollü yanma için ayrılan zamanın kısılmasına neden olur. TG zamanı artınca; silindir içerisinde biriken yakıt artar, yakıtın yanması ile oluşan basınç ve mekanik zorlanmalar artar ve sonuçta dizel vuruntu oluşur. Yakıtın setan sayısı arttıkça, tutuşma meyli de artar (Safgönül vd 2008).

2.1.1.b. Tutuşma gecikme zamanı

Yanmadaki en önemli parametrelerden birisi tutuşma gecikmesidir. Tutuşma gecikmesi (TG); yakıt enjeksiyonun başladığı zaman ile yanmanın başladığı zaman arasındaki farktır. TG zamanı, yakıtın fiziksel ve kimyasal özellikleri ile değişmektedir. Ancak kimyasal özelliklerin, bu zaman üzerindeki etkisi büyüktür. Yüksek setan sayılı yakıtların otomatik ateşlemesi kolaydır ve TG zamanı kısadır. Biyodizellerin setan sayıları dizel yakıttan daha düşük olduğu için TG zamanı daha uzundur (Canakci *et al.* 2009).

Şekil 2.3’de içten yanmalı bir dizel motorundaki yanma işlemini ile oluşan silindir içi basınç değeri krank mili açısına göre değişimi görülmektedir.



Şekil 2.3. Bir dizel motordaki basınç-krank mili açısı değişimi

Bu grafik günümüz common-rail yakıt enjeksiyon sistemli motorlarında farklı olabilir. Dizel motorlarda yanma başlamadan hemen önce, yakıt silindir içerisine enjekte edilir. Yakıtın homojen olmayan dağılımı nedeniyle homojen olmayan bir yanma ve homojen olmayan gaz sıcaklığı oluşur. Yakıt hava karışımı ve yanma işlemi karmaşık bir işlemdir.

Şekil 2.3’de yanma odası içine yakıtın gönderilmeye başladığı (1) zaman ile yanmanın başladığı (2) zaman arasındaki a_1 süresi “tutuşma gecikmesi (TG) olarak tanımlanmaktadır. Basıncın aniden yükselmesi, TG zamanının bittiğini gösterir. TG zamanı sonundaki a_2 fazında, yanan karışım önceden hazırlanmış homojen karışım niteliğinde olduğu için yanma sonunda çok yüksek miktarda ısı elde edilir. Bu nedenle TG zamanı sonunda elde edilen ısı kontrolsüz bir şekilde elde edilir. Bu yanma fazına kontrolsüz yanma veya ön karışimli yanma denir. Bu yanmanın süresi yaklaşık 5-7 [°ka], basınç yükselme hızı 300 [kPa/°ka] olur. Bu ani basınç yükselmesine dizel vuruntusu denir. Daha sonra 35-40 [°ka] kadar süren karışım kontrollü yanma fazı olan a_3 fazı oluşur. Bu fazda silindire yakıt püskürtülerek ortamdaki oksijen ile yanması sağlanır. Ortam sıcaklığı yüksek olduğu için, püskürtülen yakıt hemen yanar. Yani yanmanın kontrolü, püskürtme ile sağlanır. Bu fazda elde edilen ısı çevrime sokulur. Silindirde hacim artışı ve ortamdaki oksijen miktarının azalmış olması, yanmanın hızını giderek düşürür. Bu yanmaya ise son yanma denir. Bu fazda (a_4), yanmamış halde bulunan çok az miktardaki yakıtın etkisiyle, az miktarda ısı salınımı olur (Heywood 1988; Chuepeng 2011; Öz vd 2003)

TG zamanı aşağıdaki eşitlik ile hesaplanabilir (Öz vd. 2003).

$$T = \frac{0.44 \exp(4650/t)}{P^{1.19}} \quad (1)$$

t : Tutuşma gecikme süresi (ms)

T : Püskürtme başlangıcında silindirdeki havanın sıcaklığı (K)

P : Püskürtme başlangıcında silindirdeki havanın basıncı (Pa)

TG süresi ile kontrollü yanma süresi arasında ters orantı vardır. TG süresi kısa olursa, kontrollü yanma süresi uzar. Bunu sonucunda ısı yayılım hızı düşer, egzozda kararır olur. TG süresi artarsa, silindir içerisindeki havanın basınç ve sıcaklığı artar, yakıt silindire gönderildiği andan itibaren (yakıt silindirin diğer köşelerine ulaşmadan) yanma başlar. Bu da yakıtın polimerizasyonuna ve dehidrojenizasyonuna neden olur.

2.1.1.c. Setan sayısı

İçten yanmalı motorlarda kullanılan yakıtın ateşlenme kalitesi; benzin motorlarda oktan sayısı, dizel motorlarda setan sayısı ile tanımlanır. Genel olarak yüksek oktan sayısına sahip bir yakıt, düşük setan sayısına sahiptir. Dizel yakıtların setan sayısı, TG zamanı ilişkili bir değerdir. TG zamanı kısa olan bir yakıtın setan sayısı yüksek, TG zamanı uzun olan bir yakıtın setan sayısı düşüktür. Setan sayısının tanımlanması için dünya çapında standartlar tespit/kabul edilmiş ve bu kapsamda ASTM D613 (American Society for Testing Materials) ve ISO-5165 (International Organization for Standardization) standartları tanımlanmıştır. Bu standartlara göre; “uzun düz zincirli hidrokarbon yapılı *hekzadekan* ($C_{16}H_{34}$)’ın setan sayısı 100, yüksek dallanma yapısına sahip 2,2,4,4,6,8,8-*heptametilnonan* ($C_{16}H_{34}$)’ın setan sayısı (kötü tutuşma kabiliyetinden dolayı) 15” olarak kabul edilmiştir. Bu iki referans noktası (hekzadekan ve heptametilnonan) dikkate alınarak; bir yakıtın setan sayısının tanımlanmaktadır. Hekzadekan ve heptametilnonan’dan oluşan bu aralık (15-100), Setan Ölçeği olarak tanımlanmaktadır. (Knothe 2005) . İlk setan ölçeği tanımlaması yapılırken alt sınır tanımlaması için α -metil-naftalin kullanılmış ve setan sayısı 0 kabul edilmişti. Heptametilnonan kullanımı son yıllarda yaygınlaşmıştır. Bu durumun muhtemel sebebi, 2,2,4,4,6,8,8-*heptametilnonan* ($C_{16}H_{34}$)’ın daha ucuz olmasıdır (Öz vd 2003).

Bir yakıtın setan sayısı CFR veya BASF motoru kullanılarak tespit edilir. Deneyler esnasında kullanılan CFR motoruna ait çalışma şartları (giriş sıcaklığı: 339 °K, çeket sıcaklığı: 373 °K, hızı: 900 rpm, enjeksiyon zamanı: 13 °KMA önce ÖÜN) sabittir. Burada önce setan sayısı tespit edilecek olan yakıtın TG süresi tespit edilir. Daha sonra

aynı sıkıştırma oranında aynı TG süresini yakalayacak *hekzadekan* ve *heptametilnonan* karışımları yakılır. Aynı TG süresini veren karışımdaki *hekzadekan* ve *heptametilnonan* yüzde miktarları kullanılarak o yakıtın setan sayısı tespit edilir (Ferguson and Kirkpatrick 2001; Safgönül vd 2008)

$$\text{Setan Sayısı} = (\% \text{ hekzadekan}) + 0.15 (\% \text{ heptametilnonan}) \quad (2)$$

Bir yakıtın setan sayısının tespit edilmesi hem zaman alıcı hem de masraflı bir işlemdir. Bu nedenle yakıtların setan sayıları, Setan İndeksi (SI) denilen bir metot ile bulunur. Yakıtın ateşleme kalitesini (ASTM D976) tahmin etmek için kullanılan bir değerdir. Bu değer saf veya karışım yakıtla çalışan motorlar için uygundur ve setan sayısına yakın bir değer verir. Setan sayısını tespit etmek için kullanılan bir diğer yöntem de Dizel İndeks (DI) tespitidir. Bu değer, yakıtların hidrokarbon bileşenlerini (n-parafinler yüksek ateşleme kalitesine, aromatik ve naftenik bileşenler düşük ateşleme kalitesine sahiptir) analiz ederek, yakıtın ateşleme kalitesini tanımlar.

$$\text{DI} = \text{Anilin Noktası (°F)} \times \frac{\text{API}}{100} \quad (3)$$

Anilin Noktası: Anilin genel formülü $C_6H_5NH_2$ olan ve çok düşük tutuşma meyline sahip bir bileşendir. Aromat grubudur ve aromatik grubu yakıtlarda düşük sıcaklıklarda bile karışırken parafin yakıtlarla karışması oldukça zordur. Dizel yakıt parafinik yapıda olduğu için, parafinik yüzdesi ne kadar büyükse anilinle karışma sıcaklığı da o kadar büyük olacaktır. Ölçülecek yakıtın dizel indeksi bulunurken, eşit miktarlarda yakıt ve anilin karıştırılır. Karışım ısıtılıp anilinin tamamen erimesi sağlanır. Tekrar soğumaya bırakıldığı zaman, anilinin ayrılmaya başladığı nokta, anilin noktası olarak tespit edilir (Öz vd 2003; Safgönül vd 2008)

API: Amerikan Petrol Enstitüsü (American Petroleum Institute) tarafından tanımlanan bir değerdir. Petrol akışkanlarının belirli sıcaklıktaki yoğunluğunu ölçmek için kullanılır.

Bu değerin yüksek olması, spesifik yerçekimin düşük olduğunu, parafinitenin yüksek olduğunu ve iyi ateşleme kalitesine sahip olduğunu gösterir.

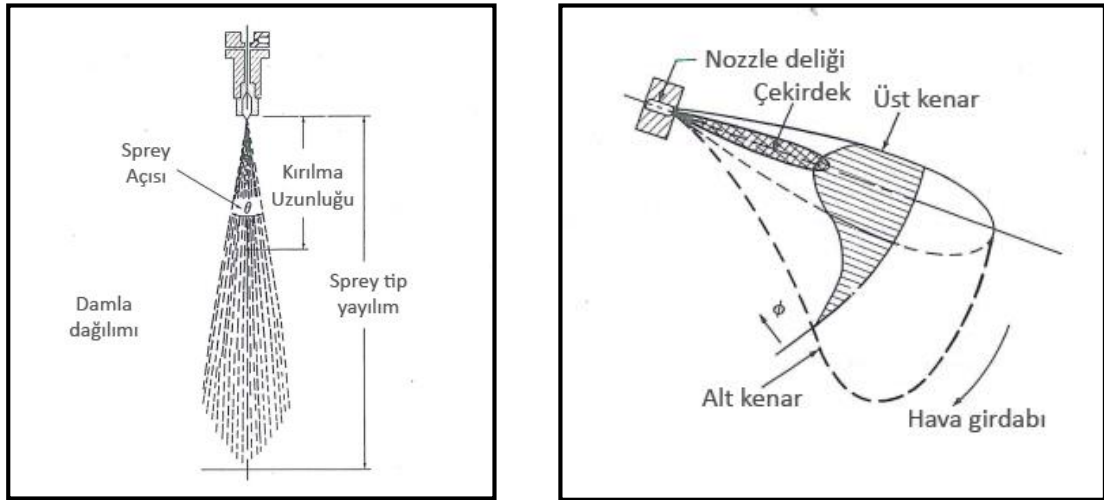
Dizel yakıtta (özellikle No 2 dizel yakıt) bulunan aromatik bileşenler, setan sayısının azalmasına neden olur. Fakat zincir yapıdaki n-alkali miktarındaki artış, setan sayısının artmasına neden olur. Setan sayısı, zincir uzunluğunun azalmasıyla ve dallanmanın artmasıyla azalmaktadır. Bir dizel yakıtın minimum setan sayısı ASTM D975 standardına göre 40, biyodizel yakıtın setan sayısı ASTM D6751 standardına göre 47 ve EN 14214 standardına göre 51 olarak tanımlanmaktadır. Bazı yağlı bileşenlerin setan ölçeğinden daha yüksek setan sayısına sahip olduğu için bu bileşenler için akışkan yanma kalitesi teriminin kullanılması önerilmiştir (Knothe 2005). Yüksek hızlı dizel motorlarda setan sayısı 50-65, düşük hızlı dizel motorlarda setan sayısı 25-45 olan yakıtlar tercih edilirken, büyük kapasiteli gemilerin dizel motorlarında rezidüel fuel-oil olarak bilinen 20 setan sayılı yakıtlar tercih edilir (Öz vd 2003; Safgönül vd 2008).

2.1.1.d. Yakıt atomizasyonu

Ön karışımlı yanma fazında, silindirin gaz basıncı yanma oranına bağlıdır. Bu faz, tutuşma gecikme zamanı ve enjekte edilen yakıtın sprey gelişimiyle kontrol edilebilir. Bu nedenle, yakıtın silindir içerisinde hava ile homojen karışabilmesi, etkin bir yanma sağlanabilmesi ve bunun sonucunda yüksek basınç değerinin elde edilebilmesi açısından yakıt atomizasyonu önemlidir (Canakci *et al.* 2009).

Yakıt silindire, yüksek basınç altında küçük delikli enjektörler üzerinden püskürtülür. Bu şartlarda silindire girerken yakıt, ince zerrelere ayrılarak yüksek sıcaklık ve yoğunluktaki hava içerisinde kısmen buharlaşır. Yakıt bu fiziksel olaylarla birlikte tutuşmayı başlatacak bazı kimyasal reaksiyonlara maruz kalır. Piroliz denilen bu reaksiyonlar, aktif atomların oksitleştirilmiş radikallerin oluşumu gibi ilk ekzotermik reaksiyonlardır (Öz vd 2003).

Standart dizel enjektörleri, genel olarak 200-1700 atm basınç aralığında çalışırlar. Enjeksiyon zamanında silindir içindeki hava, 50-100 atm basınç, 1000°K sıcaklık, 15-25 kg/m³ yoğunluğa sahiptir. Enjektör nozzle çapı 0,2-1 mm arasında değişirken boy/çap oranı 2-8 arasında değişir. Dizel yakıtın viskozitesi 3-10 kg/ms, rölatif özgül ağırlığı 0,8 ve 300K deki yüzey gerilmesi 3×10^{-2} N/m dir. Dizel motorlarda enjeksiyon zamanında (sıkıştırma strokunda) yakıt, bir nozzle çıkışından koni şeklinde sprej haline dönüşür. Yakıtın sprej formatında iki farklı ayrılma görülür. (1) Sprej jeti aşağı doğru ilerlerken dağılma gösterir, (2) yüksek hızda çıkan sprej jeti yüksek basıncın içerisinde ilerlerken etrafındaki havanın etkisiyle daha küçük parçalara ayrılır. Bu iki nedenden dolayı yakıt damla çapı giderek küçülür ve yakıt atomize olur. Şematik sprej gösterimi Şekil 2.4’de sunulmuştur (Chuepeng 2011; Heywood 1988).



Şekil 2.4. Sprej oluşum şekli

2.1.1.e. Viskozite

Yakıt atomizasyonunda yakıt viskozitesi çok önemlidir. Viskozite, yakıtın iç sürtünmelerinden dolayı akmaya karşı göstermiş olduğu dirençtir. Sıvı yakıtların akıcılığını tanımlayan bir değer olup, özellikle dizel motorların yakıt besleme ve püskürtme sistemlerinde önemli bir parametredir. Yakıtın viskozitesi azaldıkça, borulardaki akış direnci azalır ve püskürtme ile oluşan yakıt demeti içindeki yakıt

damlacık çapları küçülür, yanma iyileşir ve is miktarı azalır. Viskozite değerinin çok düşük olması ise püskürtme sisteminde (akıcılığın yüksek olması nedeniyle) kaçaklara neden olur. Sıcaklık viskoziteyi önemli derecede etkilediği için, viskozite değerlerinin tanımlanmasında sıcaklık tanımı her zaman yapılmalıdır. Yakıt viskozitesinin 50 °C de 1.5-5 Engler derece olmalıdır. Bu değerlerin üzerindeki yakıtlar ısıtılarak kullanılmalıdır (Bosch 2007; Safgönül vd 2008).

2.1.1.f. Soğuk akış özelliği

Bu özellik akma noktası sıcaklığı, bulutlanma noktası sıcaklığı ve soğuk filtre tıkanma noktası sıcaklık değerleri ile ifade edilir.

Bulutlanma noktası sıcaklığı; kısaca CP (Cloud Point) olarak da bilinen bu sıcaklık değeri, ortam sıcaklığının azalması sonucunda akışkan haldeki yakıtın katılaşmaya başladığı, yani moleküler yapıda ilk katı kristallerinin oluştuğu sıcaklık değeridir.

Akma noktası sıcaklığı; kısaca PP (Pour Point) olarak da bilinen bu sıcaklık değeri, akmanın durduğu, sıvı haldeki yakıtın katılaşmayı tamamladığı sıcaklık değeridir.

Bulutlanma noktası sıcaklığı, yakıt deposundan yanma odasına gelen yakıtın, yakıt filtresinde katılaşmaya başladığı sıcaklık değeri iken, akma noktası sıcaklığı ise yakıtın jelleşmeye başladığı sıcaklık değeridir. Akma noktası sıcaklık değeri, bulutlanma noktası sıcaklık değerinden her zaman daha düşüktür (Graboski and McCormick 1998).

Yakıtın soğuk havalarda depodan motora akmasını, filtrelerden geçmesini ve püskürtme kalitesini etkilediği için motorun etkin bir şekilde çalışması açısından her iki sıcaklık değeri de çok önemlidir. Çünkü püskürtme pompası ve enjektörler çok küçük toleranslarda işlenmiş motor parçalarıdır ve yanma olması için yakıtın bu parçalardan geçerek yanma odasına ulaşması gerekmektedir (Öz vd 2003).

Soğuk filtre tıkanma noktası sıcaklığı; kısaca CFPP (Cold Filtr Plung Point) olarak da bilinen bu sıcaklık değeri, soğuk havanın etkisiyle katılaşmayı ölçen bazı dinamik testler tarafından tespit edilir. Bu sıcaklık değeri tespit edilirken, yakıt delik aralığı standart olan bir süzgeçten geçirilir ve akmanın tamamen durduğu bu sıcaklık soğuk filtre tıkanma noktası sıcaklığı olarak tespit edilir (Graboski and McCormick 1998).

Yakıtın soğuk havalardaki davranışını iyileştirmek amacıyla kullanılan katkı maddeleri bulutlanma noktası sıcaklığını değiştirmez, ancak daha küçük boyutta katı kristali oluşmasını sağlar. Böylece akışın engellenmesi geciktirilmiş olur. Bu nedenle katkı maddeleri akma noktası sıcaklığını ve soğuk filtre noktası sıcaklığını iyileştirmeye yarar (Graboski and McCormick 1998).

CP, PP, CFPP ve LTFT (Low Temperature Flow Test) değerleri yakıtlar için ayırt edici önemli özelliklerdir. Düşük sıcaklık akış özelliklerini ifade eden CP ve PP sıcaklık değerlerinin arasındaki ilişki, Kuzey Amerika da LTFT değeri ile Kuzey Amerika'nın dışında ise CFPP değeri ile ifade edilmektedir (Knothe 2005).

2.1.1.g. Alevlenme noktası sıcaklığı

Parlama noktası sıcaklığı olarak da bilinen bu değer, yakıt buharının alev ile temas ettiğinde bir an için alev aldığı sıcaklık değeridir. Bu yanma süresi 5 saniyeden fazla sürerse, bu sıcaklık yanma sıcaklığı olarak tanımlanır. Yakıtın sıcaklığına ve yakıt-hava karışımına bağlı bir değer olduğu için, yakıtın buharlaşma miktarına dolayısıyla buharlaşma basıncına da bağlıdır. Bu sıcaklık yakıtın depolanabilme kabiliyetini ve taşıma esnasındaki güvenilirliğini gösterir. Bu değer; benzin için 25°C, dizel için 55°C, ağır dizel yakıt için 65°C, biyodizel için 120-180°C'dir. Bu nedenle alevlenme noktası sıcaklığı yüksek olan yakıtların depolanması ve taşınması kolaydır (Safgönül, ve diğerleri 2008). Bu değer tespiti DIN EN 22719 standardına göre Pensky-Martens metodu kullanılarak yapılır (Öğüt ve Oğuz 2006).

2.1.1.h. Isıl değeri

İYM’larda yakıtın kimyasal enerjisi, mekanik enerjiye dönüştürülür. Dolayısıyla yakıtın sahip olduğu enerji, elde edilebilecek güç (veya ısı enerjisi miktarı) hakkında bilgi verir. Bir yakıtın ısı enerjisi, motor verimi açısından en önemli parametredir. Yakıtın ısı değeri (ısı enerjisi); birim kütle yakıtın yanması ile elde edilen enerji miktarıdır. Birimi kJ/kg veya kcal/kg’dır. Yanma sonucunda elde edilen enerji miktarı ürünlerdeki H₂O bileşeninin fazına göre iki farklı şekilde tanımlanır. Eğer yanma sonunda ürünler arasında ki H₂O bileşeni, gaz fazında ise alt ısı değeri, sıvı fazda ise üst ısı değeri olarak ifade edilir. Silindir içindeki yüksek sıcaklıktaki yanmanın etkisiyle egzoz gazlarında su buharı fazındadır. Bu nedenle bir yakıtın ısı değeri tespit edilirken, alt ısı değeri kullanılır. Yakıtların ısı değeri DIN 513900-3 standardına göre tespit edilir (Öğüt ve Oğuz 2006).

2.1.2. Motor karakteristik özellikleri

İYM performansları, geometrik ve termodinamik parametreler ile tanımlanır. Silindir çapı, biyel kol uzunluğu, krank yarıçapı, strok, krank açısı motorun geometrik parametreleridir. Tork, efektif güç, ortalama efektif basınç, efektif verim, volumetrik verim ve efektif yakıt tüketimi ise termodinamik parametrelerdir (Ferguson and Kirkpatrick 2001). Geometrik parametreler motorun tasarımı ve imalatı esnasında kullanılan parametreler olduğu için bu çalışma kapsamında incelenmeyecektir. Çalışmanın içeriği nedeniyle, sadece motorun termodinamik karakteristikleri incelenmiştir.

2.1.2.a. Tork

Motor torku dinamometre ile ölçülen bir değerdir. Dinamometre, motora harici bir yük sağlar ve motordaki yükü absorbe eder. İlk yapılan dinamometreler de motor gücünü absorbe etmek için mekanik sürtünme kullanılarak fren etkisi oluşturuluyordu. Bu nedenle güç absorbe eden veya fren beygircüğü olarak da tanımlanmaktadırlar. En genel

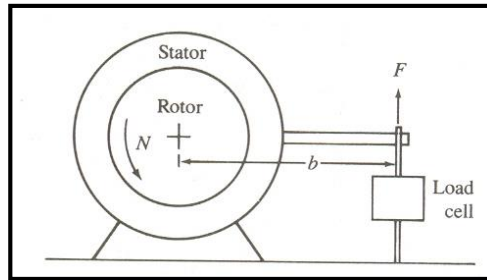
olarak hidrolik ve elektrikli olmak üzere iki tip dinamometre mevcuttur. Hidrolik dinamometre veya su freni; motor şaftına monte edilen bir kasanın içine yerleştirilen bir rotordan oluşmaktadır. Kasa içerisinde su sürekli olarak akar. Rotorun su içerisindeki kesme kuvvetlerine sahip olduğu için rotor tarafından emilen güç, sudaki sürtünmenin etkisiyle dağıtılır. Kasa içerisinde akan su seviyesinin ayarı, absorbe edilen torku değiştirir. Elektrikli dinamometreler; doğru akım, yenilenebilir alternatif akım ve endüksiyon akım olmak üzere farklı türleri vardır. Elektrik dinamometresinde absorbe edilen güç, güç veya akım olarak elektrik enerjisine dönüştürülür. Üretilen elektrik, ısı olarak bir ısıtıcıda veya soğutucuda kullanılır. Doğru akım ve yenilenebilir alternatif akım dinamometrelerinden elde edilen enerji birçok faydalı sistemde kullanılabilir. Elektrikli dinamometrelerin önündeki en büyük engel yüksek maliyetidir (Ferguson and Kirkpatrick 2001) .

Bir hidrolik dinamometreye ait şematik resim Şekil 2.5’de gösterilmektedir. Bu şekle göre tanımlan tork (T), aşağıdaki eşitlik ile hesaplanır. Tork ve yakıt tüketimi, yakıt özelliklerine ve motor tasarımına bağlıdır (Heywood 1988; Canakci, Ozsezen and Turkcan 2009)

$$T = F \cdot b \quad [\text{Nm}] \quad (4)$$

F : Rotorun dönmesi ile statorda oluşan tepki kuvveti (N)

b : Rotor ile kuvvet merkezi arasındaki mesafe (kuvvet kolu) (m)



Şekil 2.5. Hidrolik dinamometre

2.1.2.b. Efektif güç

Motor tarafından üretilen ve dinamometre tarafından emilen güç (P), tork (T) ve açısal hız (w) yardımıyla bulunur.

$$P = T \cdot w = T \cdot (2 \cdot \pi \cdot N) \quad (5)$$

$$P = \frac{2 \cdot \pi \cdot N \left(\frac{\text{dev}}{s} \right) \cdot T (\text{Nm})}{10^{-3}} \quad [\text{KW}] \quad (6)$$

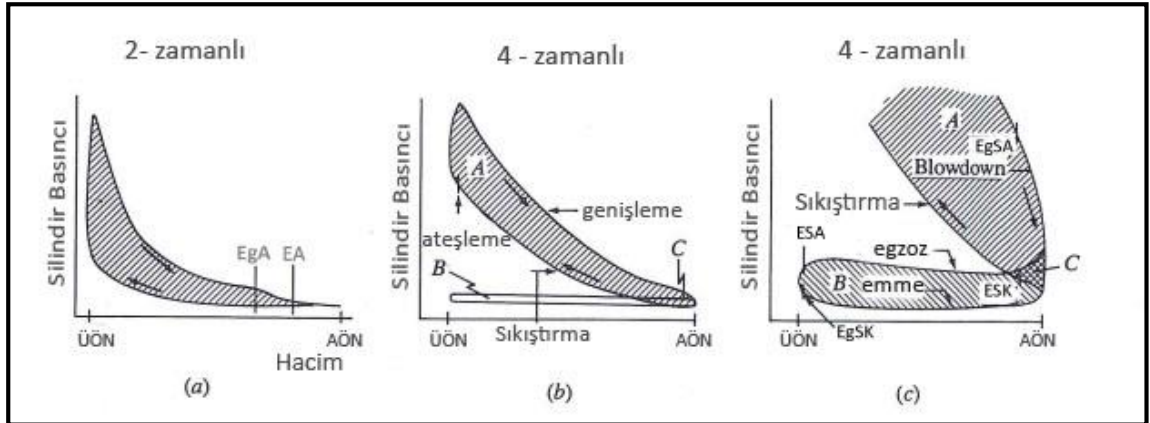
N : Motor devri (dev/dak)

T : Tork (Nm)

Yukarıda tanımlanan motor gücü (P), bir fren durumundaki motoru yüklemek için gerekli olan güce eşit olduğu için, fren gücü (P_b) olarak tanımlanmaktadır. Tork; motorun iş yapma yeteneğini ölçerken, güç motorun yaptığı iştir. Bu nedenle tork motor boyutuna bağlı bir büyüklüktür (Heywood 1988).

2.1.2.c. İndike çevrim işi

Motorda yakıtın yanması sonucu silindirden elde edilen basınç verisi, pistonu aktarılan işin hesaplanmasında kullanılmaktadır. Silindir hacmi ve gaz basıncı diyagramı çizildiğinde (Şekil 2.6), indike çevrim işi, bu grafikteki alan hesaplanarak bulunur (Heywood 1988).



Şekil 2.6. Bir motor çevrimine ait P-V diyagramı

* (a) İki zamanlı motor (b-c) Dört zamanlı motor

İş ($W_{c,i}$); eğrinin altında kalan alanın (taralı bölge) hesaplanmasıyla bulunur.

$$W_{c,i} = \int P.dV \quad (7)$$

Bu alan iki stroklu motorlar için çok kolay (Şekil 2.6(a)) ancak dört stroklu motorlar (Şekil 2.6(b-c)) için çok zordur. Çünkü iki farklı kapalı alan vardır ve iki alanın hesabı ayrı ayrı yapılır. Her bir alan, farklı bir işi ifade eder.

- Bütüt indike İş ($W_{c,ig}$): A+C alanıdır. Sıkıştırma ve genişleme stroklarında üretilen işdir.
- Net indike İş ($W_{c,in}$): A-B alanıdır. Dört stroktaki bütün pistonlardan elde edilen iştir.

Emme ve egzoz stroklarında gazın silindire ve pistonlara gönderilmesi için gerekli olan işe Pompalama işi (W_p) denir. Şekilde B+C ile ifade edilen alandır. Eğer emme strok basıncı, egzoz strok basıncından daha düşük ise, silindirdeki gazlar pompalama işi ile transfer edilecektir. Bu durum doğal emişli motorlarda mevcuttur. Ters durumda yani egzoz strok basıncı, emme strok basıncından daha büyükse pompalama işi silindir gazlarından pistonlara olacaktır. Bu durum turbo şarjlı motorlarda görülmektedir (Heywood 1988).

Bir silindirdeki güç; çevrimden elde edilen işe bağlı olarak ifade edilir. İndike güç (P_i) olarak da bilinen bu güç, silindir içindeki gazlardan pistonu transfer edilen güçtür. İndike güç, motor hızlanması ve motor sürtünmeleri tarafından absorbe eden güçten ve pompa gücü tarafından oluşan fren gücünden farklıdır. İndike büyüklükler, motor performansı üzerinde yanma, sıkıştırma ve genişleme işleminin etkisini göstermek amacıyla kullanılmaktadır (Heywood 1988).

$$P_i = \frac{W_{c,i} \cdot N}{n_R} \quad (8)$$

n_R : Bir çevrimdeki güç stokunun krank devir sayısı olup dört zamanlı motorlarda 2, iki zamanlı motorlarda 1 değerini alır (Heywood 1988).

2.1.2.d. Ortalama efektif basınç

Birim strok hacmi tarafından yapılan iştir. Motor boyutunun çıkış etkisidir. İki farklı ortalama efektif basınç değeri kullanılmaktadır.

- İndike ortalama efektif basınç (imep): sıkıştırma ve genişleme stroklarında gaz tarafından yapılan birim strok hacminin net işidir. Genişleme stroğu esnasında silindirdeki basınç, yakıttaki ısıdan dolayı artar ve hacim artışından dolayı da azalır.
- Fren ortama efektif basınç (bmep): motor tarafından yapılan birim hacimdeki dış şaft işidir. Ortalama efektif basınç ise; motor tarafından üretilen aynı miktardaki fren işi ve indike işindeki ortalama basınçtır (Ferguson, 2001).

Ortalama efektif basınç, çevrim işinin, strok hacmine oranı ile hesaplanmaktadır.

$$mep = \frac{\text{Çevrim İş}}{\text{Strok Hacmi}} = \frac{P \cdot n_R}{V_d \cdot N} \quad (9)$$

olur ve SI birim sisteminde;

$$mep(kPa) = \frac{P(kW) \cdot n_R \cdot 10^{-3}}{V_d(dm^3)N(dev/s)} \quad (10)$$

Motor tasarımlarında maksimum fren ortalama efektif basıncı, iyi ayarlanmalı ve geniş aralıktaki motor boyutlarında sabit değerde olmalıdır. Bu nedenle bmep değeri gerçek motor tasarımlarında karşılaştırılan etkili bir parametredir. Bu değer ayrıca motorun hacmini vergilendirmek için kullanılmaktadır (Heywood 1988).

Silindir gaz basıncı, ön karışımli yanma fazında ki yanma oranına bağlıdır. Bu oran tutuşma gecikme zamanlaması ve enjekte edilen yakıtın sprej gelişimiyle kontrol edilir. Bu nedenle yakıtın viskozitesi, yakıt hava karışımı ve atomizasyon oranının artırılmasında önemli bir role sahiptir (Canakci *et al.* 2009).

2.1.2.e. Efektif yakıt tüketimi

Motorun çalışma esnasında tüketmiş olduğu yakıt miktarının ($\dot{m}_f$), elde edilen güce oranlanması ile tespit edilen bir büyüklüktür. Motorun yakıt tüketiminden bahsederken, birim yakıt tüketim miktarı ($\dot{m}_f$) yerine, birim güç başına tüketilen yakıt miktarını gösteren efektif yakıt tüketimi (b_e) kullanılması gerekir. Çünkü bir aracın birim zamandaki yakıt tüketiminin ($\dot{m}_f$) düşük olması, bu aracın yakıtı verimli kullandığı anlamına gelmez. Motor tasarımında arzu edilen, yüksek güçte düşük yakıt sarfıyatı elde etmektir. Motorun çıkış gücünü değerlendirmeden, motor performansını tespit etmek yanlış olur. Motor çıkış gücünü göz önünde bulunduran parametre de efektif yakıt tüketimi olup, bu değer düşük olması istenen durumdur. Bu değer, üretilen güce bağlı olarak yakıtın ne kadar verimli kullanıldığını gösterdiği için yakıt tüketim parametresi olarak kullanılmaktadır.

$$b_e = \frac{m_f}{P} \quad [\text{gr/kW.h}] \quad (11)$$

2.1.2.f. Efektif verim

Daha önce de belirtildiği üzere, motorlar yakıtın kimyasal enerjisini kullanarak mekanik enerji elde ederler. Bu nedenle bir motorun verimini tanımlarken, yakıtın enerjisini göz ardı etmek imkânsızdır. En genel verim ifadesi; elde edilen enerjinin kullanılan enerjiye oranı olduğuna göre; bir motordaki verim de enerji çıkış gücü veya efektif gücün kullanılan yakıtın enerjisine oranıdır.

$$\eta_e = \frac{W_e}{Q_y} = \frac{W_e/t}{Q_y/t} = \frac{P}{H_u \cdot \dot{m}_y} \quad (12)$$

$$\eta_e = \frac{1}{\left(b_e \cdot \frac{10^6}{3600}\right) \cdot H_u} = \frac{3.6 \times 10^6}{b_e \cdot H_u} = \frac{3.6 \times 10^6}{b_e \cdot H_u} \quad (13)$$

Efektif verim deneysel elde edilen çıkış gücü ile teorik elde edilen yanma enerjisinin oranıdır. Yanma enerjisi hesaplanırken yakıtın tam yandığı kabul edilir. Ama gerçekte yakıt tam yanmadığı için hesaplanan yanma enerjisi ~%96 oranında doğru olur. Bu nedenle motor verim değerleri %100 doğru değildir (Heywood 1988; Ferguson and Kirkpatrick 2001).

2.1.3. Egzoz emisyon değerleri

İçten yanmalı motor tasarımında, motor karakteristikleri kadar egzoz emisyonları da önemli bir parametredir. Emisyonların önemi öncelikli olarak küresel ısınma, asit yağmurları, sera etkisi, atmosferde artan duman yoğunluğu vs. nedenlerinden dolayı her geçen gün daha da artmaktadır. Alınan önlemlerdeki artan katı sınırlandırmalar (Çizelge 1.1) bunu açıkça göstermektedir.

Buji ateşlemeli motorların önemli egzoz emisyonları NO_x , CO ve HC'dir. Emisyon oluşum miktarı, motor tasarımı kadar çalışma şartlarına da bağlıdır. Örneğin; 1 kg benzin yakıtın yanması ile oluşan emisyon miktarı, ortalama olarak 20 gr (500-1000 ppm) NO_x , 200 gr (%1-2) CO ve 25 gr (3000 ppm) HC şeklinde tanımlanır. Dizel motorlarda partikül emisyonu önemli miktardadır. Yakıt kütlelerinin yaklaşık %0,2-0,5 küçük partiküller ($\sim 0,1 \mu\text{m}$) olarak atmosfere atılır. Benzinli motorların aksine dizel motorlarda CO emisyonu fazla değildir. Her iki motorda da (benzinli ve dizel) yakıt olarak alkol kullanılması durumunda aldehit oluşur. Doğadaki aldehit miktarının fazla olmaması ve kullanılan alkollü motor sayısının, benzinli ve dizel motorlar ile karşılaştırılamayacak kadar az olması nedeniyle bu konuyla ilgili yapılan bir önlem tedbiri henüz bulunmamaktadır. Egzoz içerisinde bulunan emisyon oranları, tahmini kimyasal denklemlerde hesap edilenden farklıdır. Çünkü yanmanın kimyası kadar, kinetiği de bu emisyon oluşumunda önemli bir yere sahiptir. Örneğin, azot oksitler ve kükürt oksitler yanmaya bağlı oluşan emisyonlar değildir. Ancak yanma sonucunda egzozdan atmosfere salınırlar (Heywood 1988).

Atmosferdeki gazların dağılımı hacimsel olarak %21'i oksijen, %78'i azot ve %1'i de diğer gazların (argon, karbondioksit, su buharı, helyum, neon, hidrojen, metan, kripton, azot monoksit, azot dioksit, ozon, ksenon, amonyak vs.) karışımıdır. İçten yanmalı motorlarda atmosfer havası kullanıldığı için oluşan emisyon değerleri, yakıt bileşenleri kadar yanma kalitesine de bağlıdır. Yakıtlar genel olarak C_xH_y kapalı formülüne sahip oldukları için yanma sonucunda CO_2 , H_2O , O_2 , NO_x oluşumu kaçınılmazdır. Diğer taraftan yanma yakıt bileşenine göre SO_x ve yanma kalitesine göre CO oluşur (İlhan vd 2013).

Egzoz emisyonlarının genel olarak insan sağlığı üzerindeki olumsuz etkileri; akciğer kanseri, bronşit, kronel bronşit, raşitizm, eklem romatizması, kalp hastalıkları, göz yanmaları, nefes darlığı, çeşitli tozların vücuttaki birikiminden doğan iştahsızlık ve neticesinde, vücudun zayıf düşerek zafiyete uğraması ve hastalığın vücudun direncini zayıflatması, kirli havanın altında yaşayan insanlarda aşırı derecede ihtiyaçlama belirtileri görülmesi, romatizma, hava kirliliği içinde yaşayan insanlarda cinsiyet bozukluğu

başlaması, suç işleme oranında artış, sinirlilik, ruhsal bozukluklar vb. etkiler gözlemlenmektedir (İlhan vd 2013).

2.1.3.a. Azot oksit emisyonu

İçten yanmalı motorlarda yanma sonucu oluşan azot oksitler; azot oksit (NO), azot dioksit (NO₂) ve nitrus oksit (N₂O)'dir. Bu emisyonlar genel olarak azot oksit (NO_x) emisyonu şeklinde tanımlanır. Egzoz emisyonları içerisinde NO oluşumu daha fazladır. Benzindeki nitrojen miktarı çok az olmasına rağmen, dizel yakıtta daha fazla miktarda azot bileşeni bulunmaktadır (Heywood 1988; Öz *et al.* 2003)

NO: NO'nun temel kaynağı, atmosferdeki moleküler halde bulunan N₂'nin oksitlenmesi ve yakıtta bulunan azot bileşenidir.

Atmosferdeki azot (N₂), Zeldovich Mekanizması olarak bilinen eşitlikler ile NO formuna dönüşmektedir. Zeldovich ilk NO oluşum mekanizmasını incelemiş ve NO dönüşümü ile ilgili iki eşitlik (14,15) tespit etmiştir. Lavoie ve arkadaşları tarafından yapılan başka bir çalışmada ise farklı bir NO dönüşümü (16) tespit edilmiştir (Heywood 1988).

Zeldovich reaksiyonları hız kontrollüdür. Bu nedenle yanma olayı ne kadar çabuk biterse, o kadar çok NO durumunu korur, yani donar. Buna göre NO oluşumuna, dolayısıyla çevre kirlenmesine en çok etkileyen tasarım ve işletme parametreleri; sıkıştırma oranı, yanma odası geometrisi, (alev ilerleme hızına ve alev yoluna etki eder), yakıt fazlalık katsayısı, emme basıncı, emme sıcaklığı, ateşleme avansı, yakıtın kimyasal yapısı, taze dolgu içindeki atık gaz yüzdesidir (Öz vd 2003).





Yakıtın yapısındaki azot (N); petrolün damıtılması esnasında daha yüksek kaynama noktalarında birikir. Damıtılan yakıtta azot, amin ve halka bileşeni (örneğin piridin, kuinolin, karbazol vs.) şeklinde bulunabilir. Bu bileşenler yanma esnasında, yanma katmanına katılabilmek için bazı termal yıkımlara maruz kalırlar. NO oluşumu için, önce daha düşük ağırlıkta azot içeren NH_3 , HCN ve CN gibi moleküller oluşur. Daha sonra NO formuna dönüşür. Ancak bu bileşenlerden NO oluşum kinetiği hakkındaki bilgi pek detaylı değildir. NO'nun oksidasyonu çok hızlı (yanma reaksiyonundan bile daha kısa sürede) olur (Heywood 1988).

Motordaki hem yanma öncesi gazlarda hem de yanma sonra gazlarda NO formu oluşmaktadır. Yanma, çok yüksek basınçlarda gerçekleşir. Alev reaksiyon tabakası çok incedir ($\sim 0,1$ mm) ve bu tabaka için ayrılan zamanda çok kısadır. Yanma işlemi esnasında genel olarak silindir basıncı artar. Yanma işleminde ilk üretilen yanmış gazlar, yanmadan sonra elde edilenden daha yüksek sıcaklıkları sağlamak amacıyla sıkıştırılırlar. Yanma sonrasındaki NO miktarı, her zaman yanmadan önceki NO miktarından daha fazladır. NO formu, yüksek sıcaklık ve yüksek oksijen konsantrasyonunda artar. Böylece daha yüksek sıcaklıktaki yanmış gazlar daha fazla NO oluşumunu sağlar (Heywood 1988).

NO₂: Benzinli yakıtlarda oluşan NO₂ oluşumu, NO yanında ihmal edilebilecek kadar azken dizel yakıtlarda bu oran, toplam NO_x emisyonlarının %10-30 kadardır. Alev tabakasında oluşan NO aşağıdaki eşitlikler ile hızlı bir şekilde NO₂ ye dönüşür.



Alev tabakasında oluşan NO₂, soğutucu akışkanın yardımıyla soğutulmazsa tekrar NO formuna dönüşür.



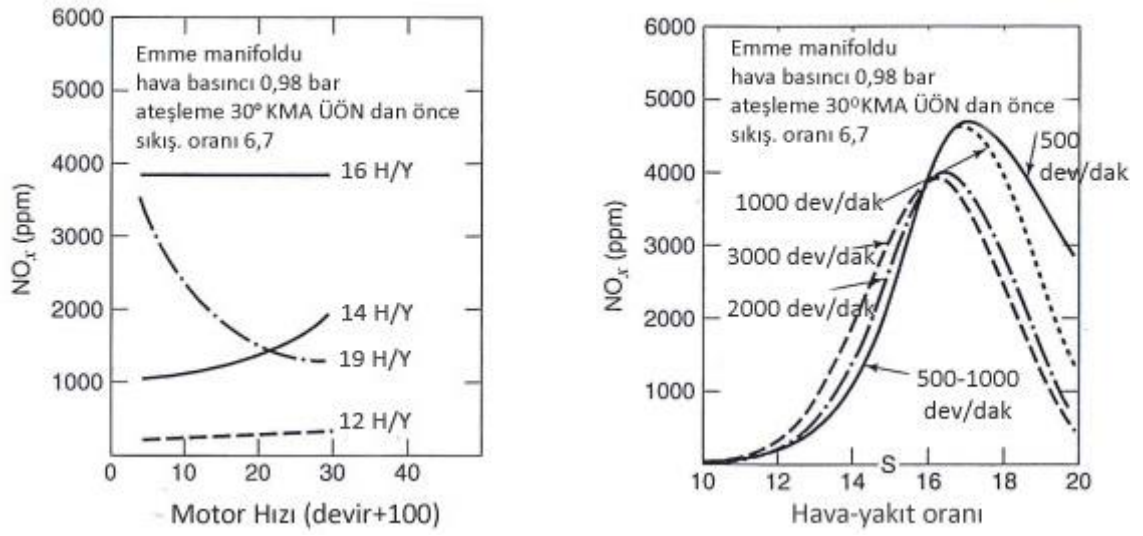
Bu durum, dizel motorda hafif yüklerde daha yüksek oranda NO_2/NO oranını açıklamaktadır (Heywood 1988).

Dizel motorlarda TG süresinden sonra gerçekleşen ön yanma (kontROLSÜZ yanma) eş zamanlı ateşleme ve alev gelişimi nedeniyle yaklaşık stokiyometriktir. Karışım kontrollü yanma fazı boyunca, yanma karışımı stokiyometriğe yakındır. Çünkü bu fazda alev türbülanslı, kararsız ve difüzyon yapıya sahiptir. Yanma işlemi esnasında karışım, yanmış gazlar, hava, eksik-zengin yanmamış yakıt-hava karışımından oluşur. Bu nedenle yanmış herhangi bir gaz elementinin bileşenindeki değişim, özel equivalans oranında yanar. Ayrıca bu bileşim, genişleme ve sıkıştırmadan dolayı basınç değişmesine bağlı olarak sıcaklığın değişmesiyle değişir. Genişlemeden dolayı sıcaklığın azalması ve yüksek sıcaklıktaki gazların hava ile karışmasından dolayı, soğuyan yanmış gazlar $\text{NO}'\text{yu}$ dondurur. Sadece dizel motorlarda olan bu etki, NO oluşum miktarının sınırlı olmasına neden olur (Heywood 1988). TG süresini takip eden yaklaşık 20 (°ka) süresinde NO_x emisyonlarını büyük kısmı oluşur (Öz vd 2003).

NO_x emisyon miktarı, büyük ölçüde sıcaklığa bağlıdır. Bu nedenle, motor ilk çalıştırma esnasında NO_x miktarı çok düşüktür ve motor yük durumuna göre emisyon miktarı (düşük yüklerde daha az) değişir. NO_x oluşumu benzinli ve dizel motorlarda farklı etkilerin sonucunda oluşmaktadır.

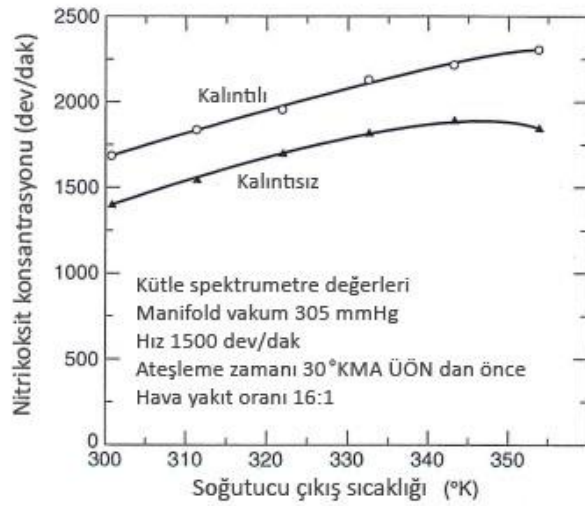
Benzinli motorlarda NO_x emisyonları; (Ferguson and Kirkpatrick 2001)

- Buji zamanına ve emme basıncına bağlıdır. Bu ilişki, zengin karışımlarda kuvvetli, fakir karışımlarda zayıftır.
- Çok fakir karışımlarda maksimumdur.
- Motor hızı ile arasındaki ilişki basit değildir. Motor hızında; yanma süresi ve ısı kaybındaki değişimler etkili faktörlerdir (Şekil 2.7).



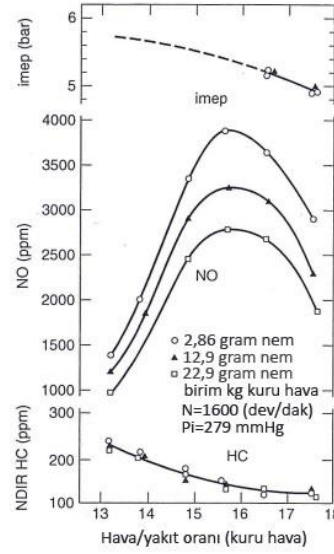
Şekil 2.7. NO_x emisyonunun değişimi (motor hızına ve hava-yakıt oranına göre)

- Soğutucu (soğutma suyu) sıcaklığındaki artış veya kalıntı bulunması hem ısı kaybını azaltır, hem de azot oksit emisyonunu artırır (Şekil 2.8).



Şekil 2.8. Soğutucu çıkış sıcaklığının NO_x emisyonuna etkisi

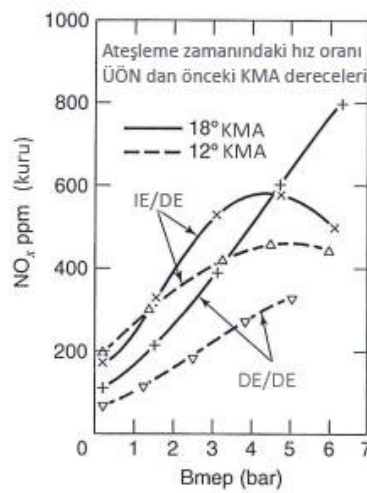
- EGR veya gaz kelebeği yardımıyla, atık gazlar tarafından dolgunun seyreltilmesi veya emme havasındaki nem, NO_x emisyonlarında azaltıcı etki yapar (Şekil 2.9).



Şekil 2.9. Nemin NO_x emisyonları üzerine etkisi

Dizel motorlarda NO_x emisyonları;

- Ateşleme zamanına kuvvetli bağlıdır.
- Direk enjeksiyonlu dizel motorlarda, yükün artmasıyla artar (Şekil 2.10).
- Endirekt enjeksiyonlu dizel motorlarda, maksimum yükten çok daha düşük yüklerde, maksimum değere ulaşır (Şekil 2.10).



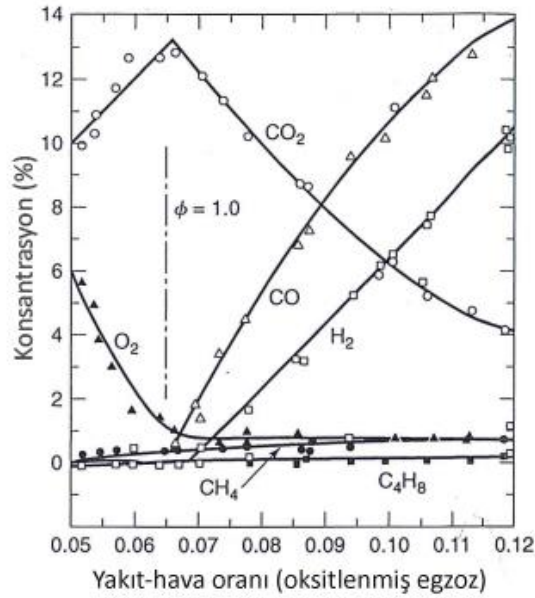
Şekil 2.10. DI ve IDI motorlardaki NO_x emisyonunun değişimi

Püskürtmeyi geciktirmek; maksimum basıncı, maksimum sıcaklığı düşürür ve TG'ni kısaltır. TG süresi azaltılarak, NO_x emisyonu azaltılabilir ancak verim düşer. Ayrıca yakıt fazlalık katsayısı azaltılarak da NO_x emisyonunu düşürmek mümkündür. Fakat yine verim düşecektir (Öz vd 2003).

NO_x emisyonları ultraviyole güneş ışınları nedeniyle hidrokarbonlarla reaksiyona girerek fotokimyasal duman üretirler. Bu dumanda ozon tabakası zarar görür. Bunun yanında solunum sistemine de zarar vermektedir. NO_x (ve SO_x) asit yağmurların temel kaynağı olarak bilinmektedir (Lin and Lin 2007b; Lin and Lin 2008).

2.1.3.b. Karbonmonoksit emisyonu

Egzoz emisyonlarındaki CO emisyon miktarı, kimyasal enerjinin motorda tamamıyla kullanılmadığını gösterir (Canakci *et al.* 2009). CO, yakıt zengini yanan motorların egzozlarında gözüktür. Bu ortamda yeterli miktarda oksijen yoktur ve yakıtın yapısındaki C'un tamamı CO₂'ye dönüşemez, bir kısmı CO olarak kalır. Bu nedenle CO oluşumuna etki eden en önemli parametre yakıt/hava oranıdır. Bunun dışındaki etkiler ikincil etkiye sahiptir. Şekil 2.11'de CO ve CO₂ emisyonlarının yakıt-hava oranı ile değişimi görülmektedir (Ferguson and Kirkpatrick 2001).



Şekil 2.11. Yakıt-hava oranına bağlı, CO ve CO₂ konsantrasyon değişimi

Şekilde, stokiyometrik şartların civarında, CO emisyonları ile equivalans oranı arasında ilişki non-lineerdir. Çok silindirli motorlarda, her bir silindirde aynı yakıt-hava oranını ölçmek önemlidir. Bazı silindirler eksik, bazı silindirler zengin karışımda çalışırsa, fakir karışımdaki silindir zengin karışımdan daha az miktarda CO üretir. Böyle bir motorun CO emisyonlarının ortalaması, equivalans oranının ortalamasına bağlı değildir. Fakat ortalama değerinden daha yüksek equivalans oranı, olması gerekenden daha fazla CO emisyonu üretir (Ferguson and Kirkpatrick 2001).

Zengin karışimli motorlarda üretilen CO emisyonları, yanma denkleminde (yanma gazlarının tamamı termodinamik dengede olması durumunda) tahmin edilebilir. Ancak fakir karışimli motorlarda; yağ filmi, birikintiler ve duvarlardaki alev-yakıt ara olayları nedeniyle yanma denklemleri kullanılarak CO emisyon miktarı tespit edilemez (Ferguson and Kirkpatrick 2001).

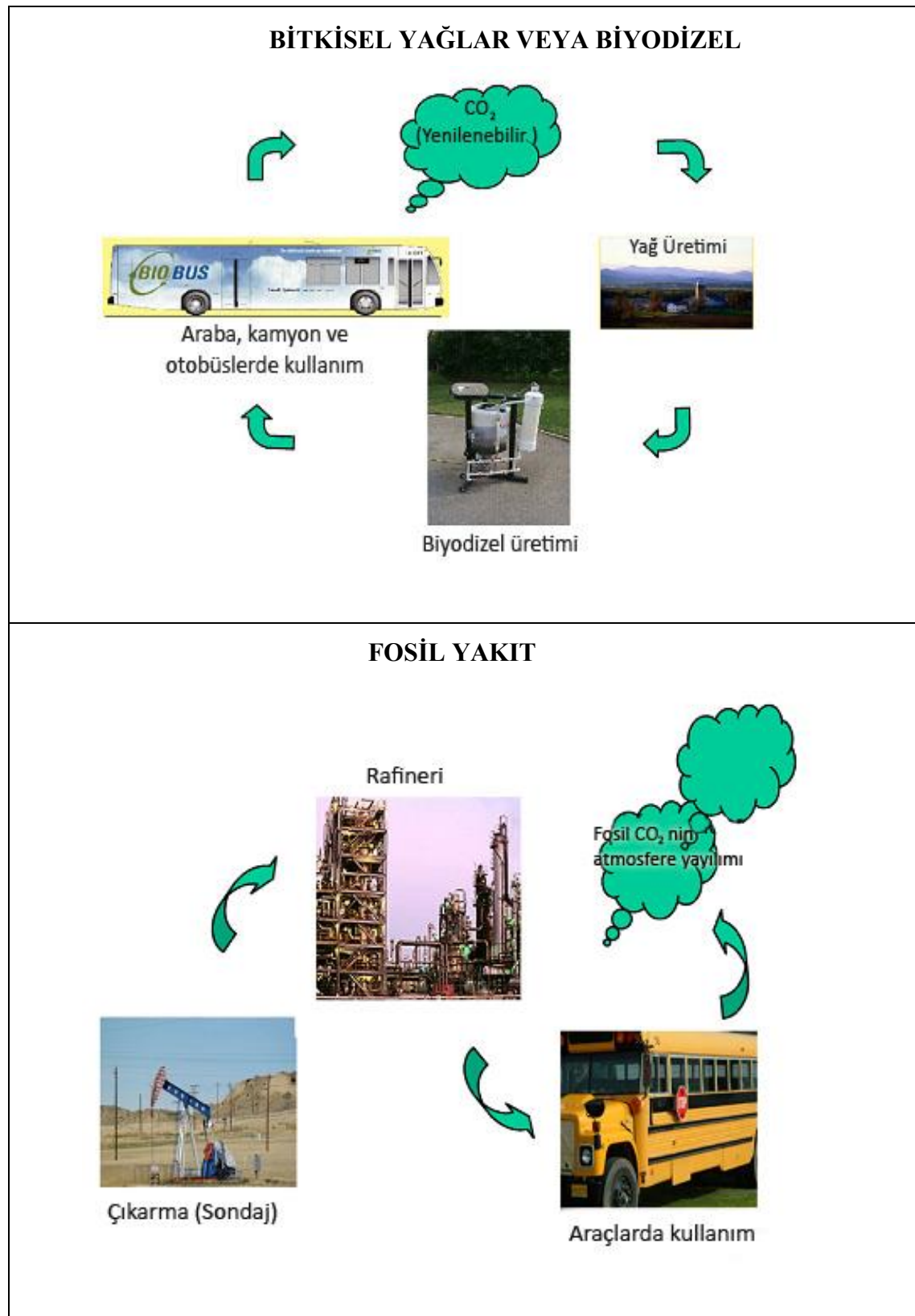
Benzinli motorlar, kısmi yükler de stokiyometrik değerde, tam yüklerde ise zengin çalışırlar. Bu nedenle CO emisyonları önemlidir ve kontrol edilmelidir. Dizel motorlar genel olarak fakir karışımda çalışırlar ve fakir çalıştıkları için çalışma esnasında CO emisyon miktarı düşüktür, bir problem teşkil etmez (Heywood 1988). Direk enjeksiyonlu

dizel motorlar, indirek enjeksiyonlu dizel motorlardan daha fazla CO emisyonu yayarlar. CO emisyon değerini azaltmak için motorun zengin karışımında çalışma suresinin (zellikle ilk çalışma suresini) azaltılması gerekmektedir (Ferguson and Kirkpatrick 2001).

2.1.3.c. Karbondioksit emisyonu

Bir dizel araçta tuketlenen 1lt yakıt 1,55 kg CO₂ üretirken, bir benzinli araçta bu değer 2,63 kg'dır (t ve Oğuz 2006). CO₂ yeryüzüne gelen uzun dalga boylu kızıl ötesi ışınları absorbe etme özelliğine sahiptir. CO₂, metan, su buharı ve diğer sera gazları bu ısı radyasyonunun bir bölümünü tutarak, dünyada canlıların yaşaması için gerekli olan ısıyı dengelemektedir. Buna karşılık CO₂ kısa dalga boyundaki radyasyonun atmosferdeki geçişine de izin vermektedir. CO₂ miktarının artması ile daha fazla kızılötesi ışınlar absorbe edilmesine ve bu ışınların atmosferin dışına çıkması engellenir. Sera etkisi olarak bilinen bu olay atmosferin daha fazla ısınmasına yol açarak küresel ısınmaya sebep olmaktadır. Küresel ısınmaya sebep olan gazların emisyonlarını azaltmak için gerekli tedbirler alınmadığı takdirde, yeryüzünde ısının her yıl aratacağını ve buna bağlı olarak gelecek yüzyılda 2 ile 5°C'lik bir sıcaklık artışı olacağı beklenmektedir (İlhan vd 2013).

Yanma işleminde yakıtın yapısındaki karbon, oksijen ile birleşerek CO₂ oluşturur. Yanma esnasında ortamda fazla miktarda oksijen bulunduğu durumlarda oluşur. evre kirliliği açısından önem arz eden bir emisyondur. CO₂ emisyon miktarı özellikle fosil yakıt kullanımında önemli seviyededir. Çünkü oluşan CO₂'nin azaltılmasını sağlayacak herhangi bir çevresel işlem/proses mevcut değildir. Ancak bu değer, yakıt olarak bitkisel yağ (veya biyodizel) kullanımında önemli değildir. Çünkü yanma ile üretilen CO₂ emisyonu bitkisel yağ retimi (CO₂ evrimi) ile azaltılır. Üretilen emisyonun salınımı ve döngüsü şekil 2.12'de gösterilmektedir (Agarwal 2007).



Şekil 2.12. CO₂ çevrimi

2.1.3.d. Kükürt emisyonu

Kükürt, benzin yakıtında çok az miktarda (≤ 600 ppm), dizel yakıtında büyük miktarda ($\% \leq 0,5$) bulunmaktadır. Dizel yakıtın içerisindeki kükürt, vuruntuyu azaltma yönünde etkisi olmasına rağmen, yanma sonucunda oluşan kükürt oksitlerin korozyona neden olması sebebiyle yakıt içerisinde bulunması istenilmeyen bir bileşendir (Öz vd 2003). Çünkü yanma sonucu oluşan SO_2 , su ile reaksiyona girerek H_2SO_4 (sülfürik asit) oluşturur. Bu asit özellikle soğuk motorda, silindir çeperlerinde ve egzoz sisteminde yoğunlaşarak korozyona neden olur. H_2SO_4 ayrıca insan sağlığı için de tehlike arz eder. Bu nedenle ASTM ve ISO standartlarına göre yakıt içindeki kükürt miktarı en fazla $\%0,5$ olarak kabul edilmiştir (Heywood 1988; Safgönül vd. 2008).

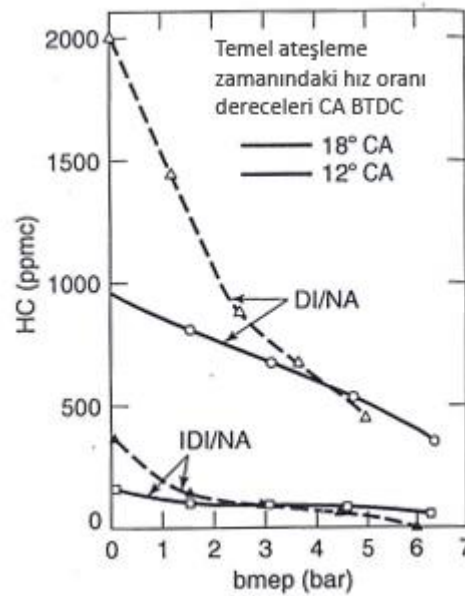
2.1.3.e. Hidrokarbon emisyonu

Hidrokarbon emisyonları incelendiği zaman, oluşum nedeninin tek bir parametreye bağlı olmadığı, birden çok etki sonucu HC emisyonu olduğu görülmektedir. Bunlar;

- Sıkıştırma ve yanma stroklarında silindir içindeki basınç arttığı için, silindirdeki gazların bir kısmı çatlaklara, yanma odası ile irtibatlı dar hacimlere (piston-segman-silindir duvarı) dolar. Bu gazlar genellikle yanmamış yakıt-hava karışımıdır. Ve yanma işlemi gerçekleştiğinde bu gazlar yanmadan kalırlar.
- Yanmamış HC emisyonlarının diğer bir nedeni de yanma odasının duvarlarıdır. Alev duvara ulaştığında söndüğü için, kısmi yanmış yakıt-hava karışımı ile yanmamış karışımın bulunduğu tabaka yanmadan kalır. Bu tabaka da yanmamış HC'nin kalınlığı ($\leq 0,1$ mm) olduğu görülmektedir. Silindir duvarlarındaki pürüzlü yüzeyin HC emisyonlarını artırdığı bilinmektedir.
- HC emisyonları, silindir ve piston yüzeyinde ince bir tabaka oluşturmaktadır. Bu ince tabaka yanmadan önce yakıt HC bileşenleri tarafından emilip, yanmadan sonra serbest bırakılır.
- Motor çevriminin etkisiyle, alevin yanması tamamlanmadan söner. Çok zengin karışımda yakıt miktarı fazla olduğu için HC miktarı artar. Benzer şekilde, çok fakir

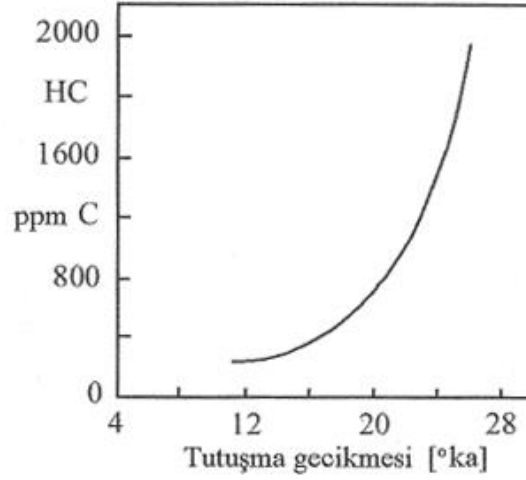
ortamda yanmanın kalitesi düşer ve bir miktar yakıt yanmadan çıktığı için yine HC miktarı artar (Heywood 1988).

Dizel motorlarda; hidrokarbon emisyonları egzoz konsantrasyonunda önemli bir yere sahiptir ve benzinli bir motordan yaklaşık 5 kat daha kötüdür. Egzozdaki hidrokarbonlar, motor ilk hareketi esnasında veya motorun ılık olduğu zamanlarda beyaz duman şeklinde yoğunlaşır. Egzoz gazındaki bazı hidrokarbon bileşenleri, dizel kokusuna neden olmaktadır. Hidrokarbon miktarının değişimi Şekil 2.13’de gösterilmektedir. Direk enjeksiyonlu motorlardan yayılan hidrokarbon miktarı, indirekt enjeksiyonlu motorlardan yayılan hidrokarbon miktarından daha fazladır (Heywood 1988; Ferguson and Kirkpatrick 2001).



Şekil 2.13. HC değişimi

Direk enjeksiyonlu motorlar için HC emisyonu, düşük yüklerde çok kötüdür. Bu nedenle özellikle motor rölanti zamanında iken HC emisyonları dikkate alınmalıdır. Yapılan çalışmalarda, kullanılan malzemenin, motor tasarım (özellikle yanma odası şekli yanmanın kalitesini belirler) ve piston çapının önemli olduğu görülmektedir (Ferguson and Kirkpatrick 2001; Canakci *et al.* 2009) TG süresi uzadıkça, HC miktarında artış olur. TG süresine bağlı olarak HC emisyon değişim Şekil 2.14’de görülmektedir (Öz vd 2003).

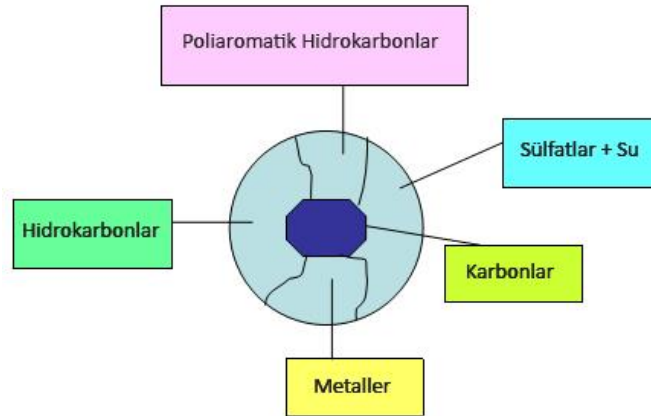


Şekil 2.14. TG zamanı ve HC ilişkisi

Dizel yakıtlar içerisinde daha yüksek kaynama noktasına sahip hidrokarbonlar bulunduğu için benzinden daha yüksek moleküler ağırlığa sahiptir. Dizel motorda yanma işlemi esnasında, yakıtın pirolizi yakıt spreyinin içinde olur. Bu nedenle dizel egzozundaki yanmamış bileşenler ve kısmi oksitlenmiş hidrokarbon bileşenleri, benzinliden daha kompleks ve daha büyük moleküldür. Dizel içindeki HC gazları, 190°C sıcaklığındaki partikül filtresi kullanılarak ölçülmektedir (Heywood 1988).

2.1.3.f. Partikül ve duman yoğunluğu

Motorlardaki yanma sonucu oluşan partikül emisyonları, solunum sistemine zarar verdiği için motor üreticilerinin dikkat etmesi gereken önemli bir husustur. Özellikle dizel motorlar için çok önemlidir. Çünkü dizel motordaki partikül azaltma prosesleri, motor performansını olumsuz etkilemektedir. Fakat bu durum düşük yükteki benzinli motorlarda, yayılan partikül miktarının az olması nedeniyle herhangi bir problem teşkil etmez (Ferguson and Kirkpatrick 2001). Partikül içeriği Şekil 2.15’de görülmektedir. Yaklaşık olarak partikül içeriği; %31 elemental karbon, %14 kükürt ve nem, %7 yanmamış yakıt, %40 yanmamış yağlama yağı ve kalan kısımda da metaller ve diğer maddeler şeklindedir (Agarwal 2007).



Şekil 2.15. Partikül madde içeriği

Partikül emisyonlarının birçok kısmı, yakıt hidrokarbonlarının tamamlanmamış yanması sonucu oluşur. Ayrıca motor yağlarının da bu oluşumda önemli etkisi vardır. Çevre Koruma Ajansı (Environmental Protection Agency) tanımına göre partikül, “325°K sıcaklıkta veya daha düşük sıcaklıkta sudan farklı herhangi bir madde olup bu madde filtre edilmiş damıtılmış egzoz ile birleşebilmektedir.” Bir filtre üzerinde birleştirilen partikül maddeleri genel olarak iki grupta incelemek mümkündür. Birinci kısım; katı karbon malzemeler veya is, ikinci kısım; hidrokarbonlar veya onların oksidasyonun (isin absorbe edilmesi veya filtre üzerinde yoğunlaşan oksidasyon ürünleri) içeren organik kısımdır. Organik kısım, motordan yukarıya yükselen (çıkan), hava ile egzozun seyreltilme işleminden etkilenmektedir. Partikül emisyonlarını ölçmek için kullanılan metotlar; seyreltme kanalları, ışık emdirimi, renksiz filtre kullanımı (filtre renksizleştirilmesi), filtre kâğıdıyla kütle tutumu, duman ölçer vs. şeklinde sınıflandırılmaktadır (Ferguson and Kirkpatrick 2001). En çok kullanılan metotlardan biri duman ölçer kullanımıdır. Duman ölçerler (duman ölçen cihazlar), filtre kâğıdı üzerinde birleştirilen partiküllerin rölatif yansımaları veya egzozdan geçen ışıkların rölatif miktarını ölçerler ancak kütleyi direk olarak ölçemezler. Böylece, tahmini kütle emisyon seviyesini ölçülen, gözüken duman emisyonlarından yola çıkılarak tanımlarlar. Gözüken duman emisyonları, yüksek tonajlı motorların tam yüklerinde kararlı haldedir. Emisyon ölçümünde kullanılan bir diğer metot da seyreltme kanallarının kullanımıdır. Seyreltme kanalları, atmosferde kimyasal ve fiziksel işlemlere maruz kalan partikül emisyonlarını simüle etmek için kullanılır. Seyreltme kanallarında ham egzoz gazları 52°C veya daha

az çevre havasıyla seyreltilir ve seyreltilen egzozdaki buhar numunesi partikül malzemelerini ayırmak amacıyla filtre edilir (Heywood 1988).

Partikül yapıları incelendiği zaman, partiküllerin kümeler halinde toplandığı görülmektedir. Bu toplanmalar, küme şeklindeki kürelerden, zincir şeklindeki kürelerden oluşmaktadır. Bir küme yaklaşık 4.000 kadar küre içerir. Bu kümelerde bazen akışkan hidrokarbon ve sülfat damlaları görülmektedir. Küreler, yanma ile üretilen is partikülleridir. Bu partiküllerin boyutları 10-80 nm arasında değişirken, genelde 15-30 nm boyutundadırlar (Heywood 1988).

Emisyon oranı, hafif tonajlı dizelerde 0.2-0.6 g/kg, daha büyük direk enjeksiyonlu motorlar da 0.5-1.5 gr/fren kW.h'dır. Partikül materyallerinin bileşeni, motor egzozundaki şartlara ve partikül birleştirme sitemine bağlıdır. 500°C üzerindeki sıcaklıklarda oluşan partiküller, genel olarak küre veya yuvarlak şeklinde, yaklaşık 15-30 nm boyutunda, karbon (çok az miktarda hidrojen) kümeleri halindedir. 500°C altındaki sıcaklıklarda partiküller; yüksek organik bileşenli moleküllerin partiküller üzerinde yoğunlaşması ve emilmesi ile oluşur. Bu moleküller; yanmamış hidrokarbonlar, oksijenli hidrokarbonlar (ketonlar, esterler, eterler, organik asitler), polinükleer aromatik hidrokarbonlar), inorganik bileşenler (sülfür dioksit, azot dioksit, sülfürik asit)'dir (Heywood 1988).

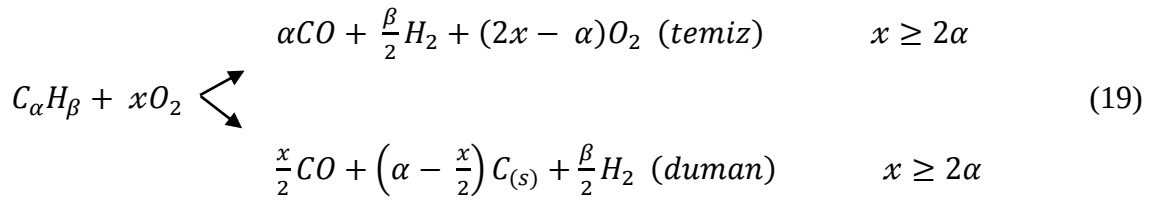
Partikül emisyonlarına katkıda bulunan tüm bileşenler (parafin, olefin, aromatik) test edildiğinde en fazla katkının aromatiklerde olduğu görülmüştür. Partikül içinde kükürt, çinko, fosfat, kalsiyum, demir, silikon ve krom bulunmaktadır. Dizel yakıttan kaynaklanan partiküller; kükürt, kalsiyum, demir, silikon ve krom iken, yağlama yağından kaynaklanan partiküller çinko, fosfat ve kalsiyumdur. Dizel yanma ile oluşan is formu, 1000-2800 °K sıcaklığında, 50-100 atm basınçta, tüm yakıtın yakabilecek miktarından çok daha fazla miktarda hava olması durumunda oluşur. Yakıttan, katı is partiküllerinin oluşması milisaniyede gerçekleşir. İs oluşumu 12-22 karbon atomu içeren yakıt molekülleri ve yaklaşık 2 oranında ki H/C ile başlar ve H/C oranı yaklaşık 0,1, bazı

10^5 karbon atomlarını içeren 20-30 nm boyutundaki kürelerin birleşmesiyle oluşan birkaç yüz nm boyutunda partiküller ile sonlanır (Heywood 1988).

Duman yoğunluğu; yakıttaki oksijen miktarı kadar, giren havanın miktarına, yakıttaki hidrokarbonların yapısına ve bileşenlerine bağlıdır. Ayrıca son yıllarda yapılan çalışmalar yakıttaki oksijen bileşenlerindeki artma ve sülfür bileşenlerindeki azalmanın, duman miktarında azalmaya neden olduğunu göstermektedir (Canakci *et al.* 2009).

Dizel yanma heterojen olduğu için dizel motorlarda duman oluşumu fazladır. Dizel motorlarda hem ön yanma hem de karışım kontrollü yanma fazında, yakıt zengin yanar. Yanma modeli (19) ve (20) de tanımlanmıştır.

Birinci kademe;



İkinci Kademe;



Bu modele göre yanma iki kademede gerçekleşir. Birinci kademede; yakıt yeterli miktarda hava ile karışırsa (yani $x \geq 2\alpha$), katı karbon üretilmediği için yanma temiz olur ve duman oluşumu gözlenmez. Eğer ortamdaki karbonu örtecek miktarda oksijen bulunmuyorsa (yani $x < 2\alpha$); yanma ürünleri karbon monoksit, is ve katı karbondur. Bu

durum, motorun içine yakıt enjekte edildiği zaman gerçekleşir. Çünkü yakıt ortama gönderildiği zaman hava ile karışması zaman alacağı ve yeterli zaman olmadığı için yakıt zengini yanma olur ve sonuçta duman oluşumu gözlenir. İkinci kademede; is ve diğer yanma ürünleri difüzyon alevinde yanar. Yanma sonucu oluşan hidrokarbonlar ve kısmi oksidasyon ürünleri organik kısmı oluşturur. Seyreltme işlemi esnasında bu bileşenlerin bazıları yeteri kadar soğur ve is emilir. Ayrıca partikülde yağlama yağından kaynaklanan bazı türler bulunur. Partikül için de organik kısım, %25-75 oranında olabilir (Ferguson and Kirkpatrick 2001; Öz vd 2003).

Partiküllerin miktarı çoğunlukla, yakıt-hava oranına bağlıdır. Son yıllarda NO_x emisyonlarının azaltılması amacıyla üretilen yeni motor tasarımları, duman oluşumunu artırmaktadır. Difüzyon alevinin sıcaklığındaki azalma, NO_x emisyon miktarını azaltırken, is oksidasyon miktarını da azaltmaktadır. Ateşleme zamanının artması, NO_x miktarını azaltır, ancak duman miktarını artırır. Dumanı azaltmak için kullanılan bir yöntemde, silindirdeki yanmanın son kademesinde türbülans artmaktadır. Silindirdeki bu artış, yardımcı gaz enjeksiyonu yardımı ile ayarlanabilir (Ferguson and Kirkpatrick 2001).

2.1.4. Motorlarda çevrimsel farklar

Çevrimsel farklılıklar, hem dizel hem benzinli motorlarda görülen bir yanma olayıdır. Motor çıkış gücünün azalmasına, kararsız çalışmaya, titreşim ve gürültüye neden olduğu için motorlarda istenilmeyen bir durumdur. Çevrimsel farklılıkların önlenmesi ile aynı yakıt tüketiminde %10 daha fazla güç elde edilebilecektir (Ceviz *et al.* 2012).

İYM’larda, motorun çalışma sistemini açıklamak için zamana bağlı olarak silindir basınçları gözlemlendiğinde, temel çevrimlerde önemli farklılıkların olduğu tespit edilmiştir. Basınç oluşumu, yanma prosesiyle yakın ilişkilidir ve temel çevrimlerde yanma işlemlerinde gerçekleşen bu farklılıklar önemli değişikliklere neden olmaktadır. Farklılıkları hem çevrimden çevrime, hem de silindirden silindire görmek mümkündür.

Silindirler arasındaki farklılıklar, aynı çevrim de aynı olayların silindirden silindire farklılık göstermesinden kaynaklanmaktadır. Yanma işlemlerinin etkisiyle oluşan bu farklılıklar aşağıdaki nedenlerden dolayı oluşmaktadır (Heywood 1988).

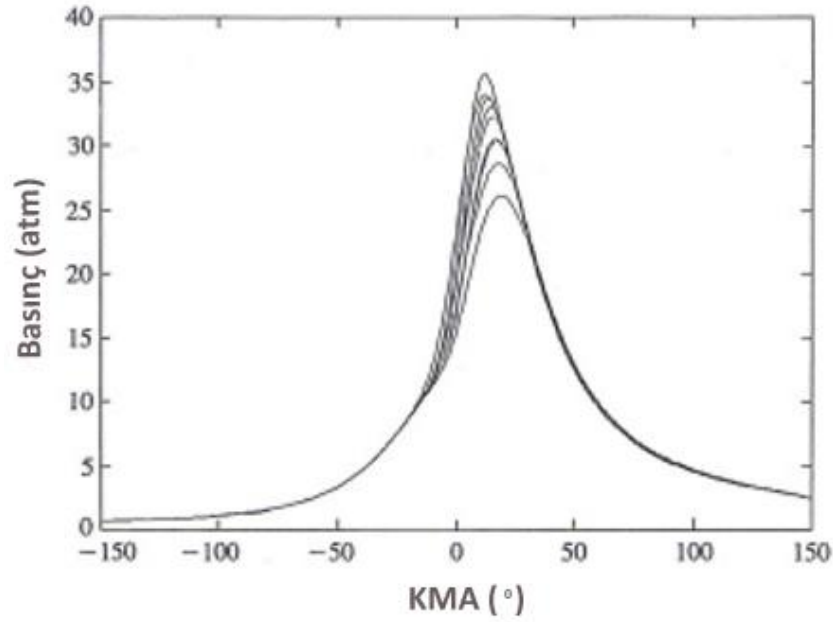
- Ateşleme zamanında, silindir içindeki karışım hareketindeki değişim,
- Her bir çevrim silindirini besleyen hava-yakıt miktarındaki değişim,
- Özellikle ateşleme avansı civarında, her bir çevrim silindirinin içinde kalan artık gaz ile taze dolgu karışımındaki farklılık.

Silindirler arası farklılıklar ve çevrimler arası farklılıklarda aynı sebeplerden kaynaklanmaktadır. Yanma işlemlerinde çevrimler arası oluşan farklılıkları tespit etmenin iki önemli nedeni vardır.

- Ortalama çevrimler için optimum ateşleme avansını ayarlamak. (daha hızlı çevrimler kısa ateşleme avansına, daha yavaş çevrimler uzun ateşleme avansına sahiptir)
- Motorun çalışma şartlarında, çevrimsel farklılık boyutlarını tanımlamak.

Gelişmiş ateşleme avansına sahip olan en hızlı yanma çevrimi, vuruntulu çevrime benzer. Bu nedenle en hızlı yanma çevrimi, motor yakıtı için gerekli olan oktan sayısını ve sıkıştırma oranının sınırlarını belirler. Optimum zamandan daha yavaş olan yanma çevrimi (daha uzun ateşleme avansına sahip), tamamlanmamış yanma işlemine benzer. Bu çevrimler motorun eksik çalışma sınırlarını veya egzoz gaz resirkülasyonu (EGR) miktarının sınırlarını pratik bir şekilde ayarlar. Bu ayarlamalar motor tarafından tolere edilir.

Ateşleme avansı ve ortalama yakıt/hava oranı her zaman uyumlu olmalıdır. Ancak silindir yanma işlemlerinin ortalaması için optimum şartı taşıma zorunluluğu yoktur. Silindir basıncındaki değişimler, aracın fren torku ile arasındaki ilişkiyi göstermektedir. Silindir basıncındaki çevrimsel farklılıkların ve onlara sebep olan karışımın yanma oranındaki farklılıklar Şekil 2.16'da gösterilmektedir.



Şekil 2.16. Bir dizel motordaki çevrimsel fark

IMEP zaman serilerine ait çevrimsel farklılıklar; değişim katsayısı (COV / Coefficient of variation) veya Wavelet Analiz Metoduyla hesaplanabilir. COV değeri, IMEP değerlerindeki standart sapmanın (σ), IMEP ortalama değerine (μ), yüzdesel oranı olarak tanımlanmaktadır (Ceviz *et al.* 2012).

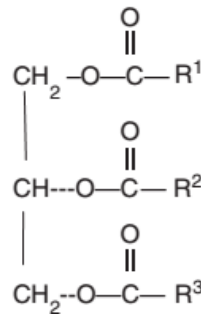
$$COV = \frac{\sigma}{\mu} \times 100 \quad (21)$$

COV değeri, birçok araştırmacı tarafından içten yanmalı motorlardaki çevrimsel farklılıkları hesaplamak için kullanılan bir değerdir. Bu değer, ortalama değerleri birbirinden farklı olan iki zaman serisi arasındaki değişimin derecesini istatistiksel olarak karşılaştırmak amacıyla kullanılmaktadır. Verilen bir zaman serisinde COV değeri, verilerdeki anlık değişimleri tanımlayan bir sayısal ölçüm yaparken, zaman serisinin spektral karakteristiğini hesaba katmaz. Bu nedenle IMEP zaman serilerinin COV değerini incelemek için Wavelet temelli spektral anlık uygulama kullanılır (Ceviz *et al.* 2012).

2.2. Bitkisel Yağlar

Dizel yakıtın bilinen sakıncaları (azalan rezerv, artan emisyon miktarı vs.) ve bitkisel yağların fiziko-kimyasal özellikleri (sıvı olması, ısı değeri dizelin yaklaşık %80'i olması, kolay elde edilebilirliği vs.) nedeniyle bitkisel yağlar, dizel yakıtlara alternatif olarak kullanılmıştır. Bitkisel yağın dizel motorlarda ki ilk kullanım denemeleri Rudolf Diesel tarafında 1876 yılında yapılmıştır (Ma and Hanna 1999).

Kimyasal yapısı C, H ve O den oluşan, yoğunluğu sudan düşük, suda çözünmeyen, hayvan ve bitki âlemindeki hidrofobik maddelerdir. Bitkisel yağlar, çoğunlukla farklı uzunluklardaki dallanmış zincir yapısına sahip trigliseridlerden oluşur. Bu oran, %90-98 trigliserid, geriye kalan çok küçük miktarı da monogliserid ve digliserid dir. Bir trigliserid'in bağ yapısı ve dizilişi Şekil 2.17'de gösterilmektedir. Burada; R¹, R² ve R³ yağ asitlerinin hidrokarbon zincirleridir (Agarwal 2007).



Şekil 2.17. Trigliserid oluşumu (Agarwal 2007)

Bir trigliserid molekülü, bir mol gliserol ile üç mol yağ asidinden oluşmaktadır. Bitkisel yağların içinde serbest yağ asitleri (genellikle %1-5 arasında), fosfolipit, fosfatit, karoten, tokoferol, sülfür bileşenleri ve su parçacıkları bulunur (Ma and Hanna 1999; Srivastava and Prasad 2000; Agarwal 2007).

Bitkisel yağların ısı değerleri, moleküldeki oksijen bileşeninden dolayı dizel yakıtlardan yaklaşık %10 daha az iken viskozite değerleri kompleks kimyasal yapısı ve büyük molekül ağırlığından dolayı dizel yakıtlardan birkaç kat daha büyüktür. En yaygın bulunan bazı bitkisel yağlara ait fiziko-kimyasal özellikler, Çizelge 2.2’de gösterilmektedir. Bu özelliklere ek olarak, doymamış yağ asit miktarlarına bağlı, değeri 0-200 arasında değişen iyot sayısına da sahiptir (Srivastava and Prasad 2000).

Bitkisel yağlardaki yapısındaki trigliserid bileşenlerinin fazla miktarda olması nedeniyle viskozite değeri, fosil yakıtlara göre daha yüksektir. Yüksek viskozite, akışı engeller, pompa ve enjektörlerde yakıtın dağıtılmasını zorlaştırır. Yakıtın kötü atomizasyonu ve yüksek jet nüfusu nedeniyle büyük damlalar oluşur. Yakıt jetleri, küçük damla spreyi yerine katı buhar olma eğilimindedirler. Bu nedenle yakıt yanma için gerekli olan hava ile karışamaz. Fakir yanmaya sahip büyük damlalar ise motor gücünde ve yakıt ekonomisinde kayıplara neden olur. Ayrıca bitkisel yağların alevlenme noktası sıcaklık değerlerinin yüksek olması, uçuculuğun düşük olduğunu gösterir. Bu nedenle yanma sonucunda, yüksek miktarda karbon artığı oluşur, enjektör tıkanır, piston halkası yapışır, yağlama yağı önce seyrelir ve daha sonrada bozulur (Agarwal 2007).

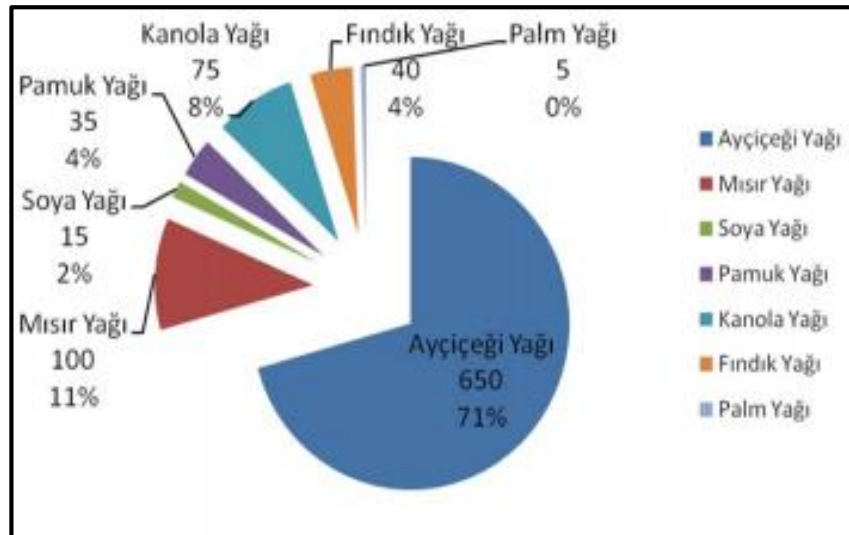
Bitkisel yağlarının yakıt olarak kullanılması durumunda (özellikle uzun süreli kullanımlarda) bazı problemler oluşmaktadır. Bu problemler;

- Soğukta ilk hareket zorluğu; yüksek viskozite, düşük setan sayısı ve parlama noktası sıcaklığının düşük olması,
- Enjektörlerin, yakıt hattındaki boruların ve filtrelerin tıkanması, kirlenmesi; bitkisel yağının yapısındaki doğal yapışkanlık ve kül bulunması,
- Motorda vuruntu; düşük setan sayısı nedeniyle tutuşma gecikme zamanında uzama,
- Motor başında ve pistonlarda karbon artığının birikmesi ve enjektörlerin erimesi; yüksek viskozite nedeniyle tam bir yanma olmaması ve kısmi yüklerde yetersiz yanma,
- Motordaki aşırı aşınma; yüksek viskozite, tam yanmanın gerçekleşmemesi, bitkisel yağlarındaki yağ asitleri, bitkisel yağının motor yağına karışarak motor yağlama yağının seyreltilmesi ve bozulması,

şeklinde tanımlanmaktadır. Bitkisel yağların kullanımı sonucunda oluşabilecek bu hataların en temel nedeni viskozite değerlerinin yüksek olmasıdır. Bu nedenle bitkisel yağların yakıt olarak kullanılabilmesi için viskozite değerlerinin azaltılması gerekmektedir (Agarwal 2007).

Bitkisel yağlar, biyodizel üretiminde, gıda sanayinde (sıvı veya katı), yem sanayi, sabun sanayi, boya sanayi ve oleokimyasal sanayinde kullanılmaktadır. Ülkemizdeki bitkisel yağ ihtiyacı 280 bin tonu ayçiçeği yağı, 199 bin tonu pamuk yağı, geri kalanı soya, mısır ve kanola olmak üzere; 500 bin tonu yerli kaynaklardan üretilerek temin edilmekte, yaklaşık 1,2 milyon ton bitkisel yağ ithalatla karşılanmaktadır (Anonim 2010).

Ülkemizde en çok tüketimi yapılan bitkisel yağlar; zeytinyağı, fındık yağı, ayçiçeği yağı, mısır yağı, kanola yağı, soya yağı, pamuk yağıdır. Bu yağların ülkemizdeki tüketim oranları Şekil 2.19’de gösterilmektedir. Ülkemizde bulunan yağlı tohum potansiyeli Çizelge 2.3’de görülmektedir. Bu yağları genel hatlarıyla inceleyelim (Srivastava and Prasad 2000; Anonim 2010; Anonim 2012)



Şekil 2.18. Türkiye bitkisel sıvı yağ tüketimleri

Çizelge 2.2. Bazı bitkisel yağların fiziko-kimyasal özellikleri

Bitkisel Yağlar	Kinematik Viskozite (38°C) (mm ² /s)	Setan Sayısı	Isı Değeri	Bulutlanma Noktası (°C)	Akma Noktası (°C)	Parlama Noktası (°C)	Yoğunluk (kg/l)	Karbon Art. (%w)	Kül (%w)	Sülfür (%w)
Mısır	34,9	37,6	39,5	-1,1	-40,0	277,0	0,9095	0,24	0,010	0,01
Pamuk	33,5	41,8	39,5	1,7	-15,0	234,0	0,9148	0,24	0,010	0,01
Keten Toh.	27,2	34,6	39,3	1,7	-15,0	241,0	0,9236	0,22	<0,010	0,01
Yerfıstığı	39,6	41,8	39,8	12,8	-6,7	271,0	0,9026	0,24	0,005	0,01
Kolza	37,0	37,6	39,7	-3,9	-31,7	246,0	0,9115	0,30	0,054	0,01
Aspir	31,3	41,3	39,5	18,3	-6,7	260,0	0,9144	0,25	0,006	0,01
Susam	35,5	40,2	39,3	3,9	-9,4	260,0	0,9133	0,25	<0,010	0,01
Soya	32,6	32,6	37,9	3,9	-12,2	254,0	0,9138	0,27	<0,010	0,01
Ayçiçeği	33,9	37,1	39,6	7,2	-15,0	274,0	0,9161	0,23	<0,010	0,01
Palmiye	39,6	42,0	-	31,0	-	267,0	0,9180	-	-	-
İç Yağı	-	-	40,0	-	-	201,0	-	6,21	-	-

Çizelge 2.3. Türkiye’deki yağlı tohum üretim miktarları [ton]

Yıl	Toplam	Soya	Yerfıstığı	Ayçiçeği	Susam	Aspir	Kolza	Çiğit	Keten tohum	Kenevir tohumu	Haşhaş tohumu
1988	1.422.230	150.000	60.000	1.150.000	45.000	150	1.400	-	3.350	1.200	11.130
1989	1.507.683	161.000	50.000	1.250.000	37.000	168	3.000	-	2.700	580	3.235
1990	1.133.797	162.000	63.000	860.000	39.000	124	2.100	-	1.570	850	5.153
1991	1.933.888	110.000	60.000	800.000	43.000	138	1.046	895.085	1.440	641	22.538
1992	2.061.082	95.000	67.000	950.000	34.000	126	1.000	905.350	758	800	7.048
1993	1.882.085	63.000	70.000	815.000	30.000	122	9	899.868	488	570	3.028
1994	1.859.052	70.000	70.000	740.000	34.000	90	10	929.902	650	400	14.000
1995	2.391.660	75.000	70.000	900.000	30.000	125	9	1.287.527	390	360	28.249
1996	2.165.632	50.000	80.000	780.000	30.000	74	5	1.219.579	228	400	5.346
1997	2.254.767	40.000	82.000	900.000	28.000	65	10	1.193.286	228	230	10.948
1998	2.407.398	60.000	90.000	860.000	34.000	72	300	1.334.778	185	99	27.964
1999	2.308.577	66.000	75.000	950.000	28.000	50	330	1.157.583	227	55	31.332
2000	2.253.448	44.500	78.000	800.000	23.800	18	187	1.295.066	173	140	11.564
2001	2.171.314	50.000	72.000	650.000	23.000	25	650	1.353.888	155	160	21.436
2002	2.514.827	75.000	90.000	850.000	22.000	25	1.500	1.457.122	130	50	19.000
2003	2.387.925	85.000	85.000	800.000	22.000	170	6.500	1.337.065	110	80	52.000
2004	2.501.419	50.000	80.000	900.000	23.000	150	4.500	1.425.850	80	30	17.809
2005	2.421.338	29.000	85.000	975.000	26.000	215	1.200	1.291.180	86	13	13.644
2006	2.789.149	47.300	77.454	1.118.000	26.545	395	12.615	1.476.556	84	13	30.187
2007	2.352.383	30.666	86.409	854.407	20.010	2.280	28.727	1.320.831	48	24	8.981
2008	2.311.432	34.461	85.274	992.000	20.338	7.068	83.965	1.077.440	40	12	10.834
2009	2.396.044	38.442	90.081	1.057.125	21.036	20.076	113.886	1.021.200	1	3	34.194
2010	2.969.477	86.540	97.310	1.320.000	23.460	26.000	106.450	1.272.800	0	7	36.910
2011	3.227.588	102.260	90.416	1.335.000	18.000	18.228	91.239	1.527.360	0	8	45.077
2012	3.138.361	122.114	122.780	1.370.000	16.221	19.945	110.000	1.373.440	13	4	3.844

Ayçiçeği Yağı; *Helianthus annuus* bitkisi olarak bilinen ayçiçeği, Rusya, Ukrayna, Arjantin, Doğu-Batı Avrupa, Çin ve ABD’de yaygın olarak yetiştirilmektedir. %65-70 oranında linoleik acid (içinde linolenik asit yoktur) içerir. Linolik ve oleik asit oranı %90 civarındadır. Genellikle pişirme yağı olarak kullanılmaktadır (Gustone 2004). Ülkemiz de hemen her bölgesinde yetiştirilebilen ve tanelerinde yüksek oranda kaliteli yağ bulunduran, ekim alanı, üretimi ve yağ üretimi bakımından ilk sırada yer alan önemli bir yağ bitkisidir. Ayçiçeği üretiminin artırılması gereken önemli bitkidir. Üretim artışı, ekim alanı veya birim alan verimi artışıyla gerçekleştirilebilir. Türkiye’de yağlı tohumlu bitkiler arasında yağ üretimi bakımından ilk sırayı alan ayçiçeği, ağırlıklı olarak Trakya bölgesinde üretilmekte olup, bununda %30,8’ni tek başına Tekirdağ ili karşılamaktadır. Edirne % 20, 1 ve Kırklareli % 11, 2 ile diğer önemli ayçiçeği üretimi yapan illerdir (Kolsarıcı vd 2005).

Kanola Yağı; yağ elde etmek amacıyla üretilen ve tohumundan elde edilen yağda ki eüristik asit nedeniyle yenilemeyen bitkisel yağlar grubundadır. Ancak yapılan ıslah çalışmaları ile yenilenebilir hale getirmek mümkündür. İlk üretim yerinin Kanada olması ve eüristik asitin ıslah edilerek kullanılması nedeniyle “Düşük Asitli Kanada Bitkisi” anlamına gelen CANada Oil Low Acid kelimelerinden üretilerek isimlendirilmiştir (Gustone 2004).

Hem yazlık hem kışlık olarak yetiştirilen tek yıllık bir bitkidir. Üretimi için humuslu ve derin topraklar ideal ortamı olmasına rağmen, arpa ve buğday yetiştirilen toparlaklarda da rahatlıkla yetiştirilebilir. Yılda 13-14 milyon ton üretim kapasitesine sahip olup en çok üretilen (soya ve palm yağından sonra) üçüncü sıradadır. Üretiminin en yoğun yapıldığı yerler; Kanada, Batı Avrupa ve Çin’dir. Eurik asitten ıslah edilen kolza yağında; %4 palmitik, %2 stearik, %62 oleik, %22 linoleik ve %10 linolenik asit vardır. Diğer yağların tamamından daha doymuş yağ oranına sahiptir (Gustone 2004).

Ülkemize 1960 yıllarında getirilmiş olan kolza özellikle Trakya yöresinde yaygın olarak yetiştirilmeye başlanmış, ancak 1979 yılında kolza yağındaki insan sağlığına zararlı olan erusik asit ve küspesinde de hayvan sağlığına zararlı olan toksik etkili glukosinalat

oranlarının yüksek olması nedeniyle yasaklanmıştır. Daha sonra “00” tipi kaliteli yağ içeren çeşitleri ülkemize getirilmiş olmasına rağmen ekimi yaygınlaştırılamamıştır (Kolsarıcı vd 2005)

Mısır Yağı; Birleşik Devletlerde yıllık olarak yaklaşık 2 milyon ton üretim yapılmaktadır. Yapısında %9-17 palmitik, %20-42 oleik, %36-66 linoleik asit içerir. Yüksek doymamışlığına rağmen, iyi oksidasyon kararlılığına sahip bir yağdır. Rafine edilen yağ, kısmi hidrojenizasyondan sonra gıda sektöründe kullanılmaktadır (Gustone 2004).

Zeytinyağı; narin ama son derece uzun ömürlü (ortalama ömrü 300-400 yıl) olarak bilinen ve arkeolojik araştırmalara göre yeryüzünün ilk ağacı olarak tanımlanan *Olea europaea* ağacının meyvelerinden fiziksel yöntemlerle elde edilen, oda sıcaklığında sıvı olan bir yemeklik yağ çeşididir. Zeytin meyvesinin yağ içeriği %35-70 arasında değişmekle beraber, meyvenin etli kısmında bu oran %75'lere kadar çıkabilmektedir. Yeşilimsi-sarı renkte, kendine has kokusu ve tadı olan zeytinyağı, diğer bitkisel yağlardan farklı olarak, iyi bir meyveden uygun zamanda hasat edildiği ve mümkün olan en kısa süre içerisinde işlendiği takdirde rafine edilmeden tüketilebilen tek yağ olma özelliğine sahiptir (Gustone 2004).

İtalya, Yunanistan, İspanya, Tunus ve Türkiye gibi Akdeniz iklimine sahip ülkelerde yetiştirilmektedir. Yıllık üretimi yaklaşık 2,5-2,8 milyon tondur. Palmitik asit oranı %8-20, oleik asit oranı %55-83 ve linoleik oranı %4-21'dir (Gustone 2004).

Soya Yağı; yıllık olarak yaklaşık 30 milyon ton üretilen soya yağı, dünyada en fazla üretilen yağdır. Amerika, Brezilya, Arjantin ve Çin üretimde başı çeken ülkelerdir. İçerdiği %18 yağ, %79 oranındaki protein nedeniyle hayvansal besinlerde ve insan gıdalarında kullanılmaktadır. Yapısında %53 linoleik, %23 oleik, %11 palmitik, %8 linolenik ve %4 stearik asit bulunmaktadır (Gustone 2004).

Soya yağında bulunan önemli yağ asitlerinden oleik ve linoleik yağ asitlerinin yüksek olması, buna karşılık linolenik yağ asidinin düşük olması yağın kalitesini arttırmaktadır. Dünyada 250-300 değişik alanda kullanımı olan soyanın ülkemizde de birçok ürünün yapımında kullanıldığı bilinmektedir. Unu, lesitini, küspesi, proteini, yağı ve onlardan elde edilen yan ürünlerin sanayi hammaddesini oluşturmaktadır. Ancak, ülkemizde soya ile ilgili entegre yan sanayi tesislerinin olmayışı, yerli üretim açısından büyük olumsuzlukları beraberinde getirmekte ve sonuçta soya tohumunun sadece yağının çıkartılarak, kalanından küspe olarak kullanılması ekonomik açıdan önemli bir kayıptır. Ülkemizde üretimin yapıldığı iller Adana, Osmaniye, Samsun ve İçel'dir (Kolsarıcı vd 2005).

Fındık Yağı; Yaklaşık 5 bin yıldır bilinen fındığın vatanı Anadolu'dur. M.Ö. 400'de Pontus kıyılarından geldiği için Pontus Cevizi adını almıştır. Sicilya ve İspanya'ya Araplar tarafından götürülmüştür. Yeryüzünde 360-410° kuzey enlemlerinde kendine özgü iklim koşullarında yetişebilen fındık, deniz kıyısından en çok 30 km içeride ve 750-1000 metreyi geçmeyen yerlerde ürün vermektedir. Dünya yıllık fındık üretiminin %67-75'i Türkiye'nin Karadeniz kıyılarında yapılmaktadır. İtalya, İspanya ve Amerika fındık yetiştiren diğer ülkelerdir (Ozdemir ve Akıncı 2004; Anonim 2013b)

2.2.1. Yağlar ve yağ asitleri

Yağlar, çift karbon sayısına (4-24) sahip, doymuş ve doymamış yağ asitleri ve gliserinin birleşiminden oluşan triesterlerdir. Yağ asitleri, uzun, düz zincirli ve çift karbonlu mono-karboksilli asitlerdir. Gliserin üç değerli bir alkol olduğundan, üç mol yağ asidiyle birleşerek esterleşir. Yağ oluşumunda gliserin kullanıldığı için bunlara gliserit de denir (Anonim 2008).

Yağ asitlerinin zincir uzunluğundaki değişiklik, doymamışlık derecesi, farklı fonksiyonel grupların bulunup bulunmamasına göre 1000'in üzerinde doğal yağ asidi tanımlanmıştır. Ancak bunların çok az miktarı (25-50 adet) bilim ve teknoloji için önemlidir (Gustone 2004).

Yağ asitlerinin, zincir yapısına, karbon sayısına göre sınıflandırmak mümkündür. Yağ asidinin yapısındaki karbon sayısı 6'dan az ise kısa zincirli yağ asidi, 6-10 arasında ise orta zincirli yağ asidi, 12 ve daha fazla ise uzun zincirli yağ asidi olarak gruplandırılırlar. Karbon arasında tek bağ varsa doymuş yağ asidi, en az iki bağ varsa doymamış yağ asidi olarak tanımlanır. Genel formülleri, $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_n\text{COOH}$ ya da çok daha genel bir yaklaşımla, R-COOH şeklindedir. (R-) alkil grubunu ve (-COOH) karboksil grubunu ifade eder. Karboksil grubu yağ asidik özelliğini kazandıran kısımdır (Anonim 2010).

Çoğu yağ asidi, kökenindeki bitkisel yağla bağlı olarak isimlendirilmektedir. Örneğin palm yağındaki asit palmitik asit, zeytinyağındaki oleik asit, keten tohumundaki linolik, linolenik asit gibi. Bu genel isimler asidin yapısı hakkında bilgi vermeyip, kökeni hakkında bilgi vermektedir. Fakat yine de asidin sistematik ismini kullanmaktan daha kolaydır (Gustone 2004).

Yağ asitleri CXX:Y şeklinde gösterilir. XX değeri karbon sayısını, Y değeri ise çift bağ sayısını gösterir. Bitkisel yağlarda bulunan yağ asit oranları Çizelge 2.4'de gösterilmiştir. Bitkisel yağların içinde serbest yağ asitleri (genellikle %1-5 arasında), fosfolipit, fosfatit, karoten, tokoferol, sülfür bileşenleri ve su parçacıkları bulunur (Ma and Hanna 1999; Srivastava and Prasad 2000; Agarwal 2007).

Çizelge 2.4. Bitkisel yağlardaki yağ asit oranları

Bitkisel Yağ Çeşidi	Yağ Asit Bileşeni (%w)									
	Myristic	Palmitic	Stearic	Arachidic	Behenic	Lignoceric	Oleic	Erucic	Linoleic	Linolenic
	14:0	16:0	18:0	20:0	22:0	24:0	18:1	22:1	18:2	18:3
Mısır	0	12	2	Tr	0	0	25	0	6	Tr
Pamuk	0	28	1	0	0	0	13	0	58	0
Keten Tohumu	0	5	2	0	0	0	20	0	18	55
Yer fıstığı	0	11	2	1	2	1	48	0	32	1
Kolza	0	3	1	0	0	0	64	0	22	8
Aspir	0	9	2	0	0	0	12	0	78	0
Susam	0	13	4	0	0	0	53	0	30	0
Soya	0	12	3	0	0	0	23	0	55	6
Ayçiçeği	0	6	3	0	0	0	17	0	74	0
Fındık	0	5,55	2,66	0	0	0	80,79	0	10,21	0
Zeytinyağı	0	10	2	0	0	0	78	0	7	1

2.2.1.a. Doymuş yağ asitleri

Çoğunlukla gıda sektöründe bulunan ve kullanılan asitlerdir. Bu yağ asitleri butirik (4:0) ile lignoserik (24:0) arasındaki çift karbonlu yağ asitlerini içerir. Karbon sayısına göre kısa-orta ve uzun zincirli olarak gruplandırılmaktadır. Doymuş yağ asitleri Çizelge 2.5’de gösterilmektedir (Gustone 2004).

Çizelge 2.5. Doymuş yağ asitleri

Doymuş Yağ Asitleri		
Genel İsmi	Karbon Sayısı	Sistematik İsmi
Butyric	4:0	Butanoic
Caproic	6:0	Hexanoic
Caprylic	8:0	Octanoic
Capric	10:0	Decanoic
Lauric	12:0	Dodecanoic
Myristic	14:0	Tetradecanoic
Palmitic	16:0	Hexadecanoic
Stearic	18:0	Octadecanoic
Arachidic	20:0	Eicosanoic
Behenic	22:0	Docosanoic
Lignoceric	24:0	Tetracosanoic

Butrik asit (4:0) ile Myristik asit (14:0) arasındaki asitler kısa ve orta zincir yapısına sahiptirler. Süt yağları ve bazı bitkisel yağlar (fındık ve palm çekirdek yağı en iyi bilinen) çok zengindir. Süt yağları, kısa zincirli asitlerin çoğunu içerir. Laurik asit, orta zincirli asitlerin en iyi bilinenidir. Palmitik asit (16:0), doymuş yağların en yaygın olanıdır. Balık yağında, süt yapında ve birçok hayvanın vücut yağında bulunmaktadır. Bitkisel yağlarda ise %5-50 arasındaki bir seviyede bulunur. Stearik asit (18:0); katı hayvansal yağlarda (tereyağı, kuyruk yağı) bulunan bir yağ asididir. Bitkisel yağlarda çok az bulunur. Arakhidik (20:0) ve üzeri yağ asitleri; uzun zincir yapısına sahip olup, seyrek olarak bulunan yağ asitleridir (Gustone 2004).

2.2.1.b. Doymamış yağ asitleri

Doymamış yağ asitlerini, monodoymamış, poli-doymamış olarak incelemek mümkündür. Poli-doymamış yağ asitleri çift zincirin pozisyonuna ve zincir sonundaki metil

pozisyonuna bağılı olarak n-3 ve n-6 olacak şekilde gruplandırılabilir. Doymamış yağ asitleri Çizelge 2.6'da gösterilmektedir (Gustone 2004).

Çizelge 2.6. Doymamış yağ asitleri

Genel İsmi	Sembol	Yapısı
Mono-doymamış		
Oleic	18:1	9c
Petroselinic	18:1	6c
Erucic	22:1	13c
Poli-doymamış (non-conjugated)		
Linoleic	18:2	9c12c
Linolenic(α)	18:3(n-3)	9c12c15c
Linolenic(γ)	18:3(n-6)	6c9c12c
Arachidonic	20:4(n-6)	5c8c11c14c
Eicosapentaenoic	20:5(n-3)	5c8c11c14c17c
Docosahexaenoic	22:6(n-3)	4c7c10c13c16c19c
Poli-doymamış(conjugated)		
Eleostearic	18:3	9c11t13t
Calendic	18:3	8t10t12c

Linoleik (C18:2) ve linolenik (C18:3) gibi doymamış yağ asitleri yakıtta tutuşma gecikmesini artırır, setan sayısını düşürür ve yanmayı kötüleştirir. Mono-doymamış asitlerin (oleik asit gibi) setan sayısı orta orandadır yani ne iyi ne de kötüdür. Poli-doymamış yağ asitleri, yanma basıncı ve yüksek sıcaklıktaki termal polimerizasyon ve kompleks oksidasyon (veya depolama esnasındaki oksidasyon) nedeniyle polimerizasyon ve kurum oluşuma meyillidir. Kurum tamamıyla yanmaz. Bunun sonucunda karbon birikimi olur ve yağlama yağı kalınlaşır (Ma and Hanna 1999).

İç yağındaki doymamış yağ asit miktarı, toplam yağ asitlerinin yaklaşık %50 si kadardır. Yüksek miktarda palmitik asit ve stearik asit içerdiği için, erime noktası ve viskozitesi yüksek bir yağdır.

Dallanmış yağ asit esterleri; esterdeki metil grubun yer değiştirmesi ile elde edilir. İzopropil ve 2-bütil dallanmış yağ asididir ve erime noktaları düşüktür. Bu nedenle bunların karışımlarının da akma-bulutlanma noktaları düşüktür (Knothe *et al.* 2003). Dallanma yapısı, setan sayısının azalmasına neden oluyor. Bunun sonucunda soğukta akış özelliği gelişir (Knothe 2005).

Araştırmalar, kimyasal yapı olarak uzun, dallanmış, tek-çift bağlı yağ asitlerini içeren yağların uygun dizel alternatif olduğunu ve artan doymamışlık derecesinin setan sayısını olumsuz yönde etkilediğini ortaya koymuştur. Bu durum oleik asitçe zengin yağları ön plana çıkarmıştır. Yüksek oleik asitli yağlarda oksitlenme direnci daha iyidir. Mono-doymamış zincirlerin oksitlenme direnci iyi ve poli-doymamış zincirlerin oksitlenme direnci kötüdür. Poli-doymamış zincirler düşük sıcaklıkta davranış özelliğini iyileştirirken, doymuş yağ asidinin düşük sıcaklık direncini kötüleştirir. Bu yüzden istenen yağ, çoğunlukla mono-doymamış ve poli-doymamış yapıda ve minimum doymuş yapıda karışımına sahip olması istenir (Öğüt ve Oğuz 2006).

2.2.2. Bitkisel yağlardan yakıt elde etme yöntemleri

Bitkisel yağların yüksek viskozite değeri, yakıt olarak kullanılması yönündeki en büyük engeldir. Bu amaçla bir bitkisel yağın viskozite değerini fiziksel veya kimyasal işlemler yardımıyla azaltmak mümkündür. Bu işlemler uygulanırken dikkat edilmesi gereken en önemli husus, yağın yakıt özelliğini korunmasıdır.

Bitkisel yağlara uygulanan bazı metotlar, hayvansal yağların yapısal farklılıklarından dolayı uygulanamaz. Literatürde, yosun, bakteri ve mantar yağları, mikroalgler, terpenler ve lateksler de incelenmiştir (Ma and Hanna 1999).

2.2.2.a. Dizel ile karıştırma

Bir akışkanın viskozite değerini düşürmek, kendisinden daha düşük viskozite değerine sahip başka bir akışkanla homojen bir şekilde karıştırmakla mümkün olabilir. Ancak karıştırma işleminde dikkat edilmesi gereken en önemli husus, iki akışkanın birbirine karıştırılabilirliği. Yani iki akışkanın polaritesinin uyumlu olması gerekir. Karışım sonunda elde edilen akışkanın homojen olup olmadığı gözle tespit etmek (özellikle bir yakıt için) sağlıklı bir sonuç doğurmaz. Bu nedenle karıştırılan iki akışkanın kimyasal yapısının çok iyi bilinmeli ve karışım işleminin homojen olmasına dikkat edilmelidir.

Sıvı yağları, dizel yakıtla homojen bir şekilde karıştırmak mümkündür. Bu amaçla 1980 yılında yapılan bir çalışmada, Caterpillar Brezilya'da ön yanma odalı bir motorda herhangi bir değişiklik yapmadan, %10 oranında bitkisel yağ ilave ettiği dizel yakıtı kullanmış, sonraki denemelerinde farklı yüzde oranlarındaki sıvı yağı dizel yakıtla karıştırmıştır. Sonuç olarak, dizel yakıtla %20 oranında sıvıyağ ilave edilmesinin motor çalışmasında ve aksamlarında herhangi bir probleme neden olmadığını, %50 karışım oranının ise ancak kısa süreli kullanımlarda problem teşkil etmeyeceğini belirlemiştir (Ma and Hanna 1999).

1983 de yapılan başka bir çalışmada Adams ve arkadaşları; 6,6 L stroklu, direk enjeksiyonlu, 6 silindirli, turbo şarjlı John Deere motoru kullanılarak, 1:1 ve 1:2 oranlardaki soya yağı: dizel yakıt karışımlarının, 600 saatlik kullanılması durumunda ki motor performansı ve karterdeki yağın viskozite değişimini incelenmiştir. Sonuç olarak; 1:1 oranındaki karışımda, yağlama yağında kalınlaşma ve belirgin bir jelleşme olduğu, 1:2 karışimli yakıtta bu durumun bulunmadığını tespit edilmiştir. Özellikle dizel yakıtın yeterli miktarda bulunmadığı zamanlarda 1:2 oranında tarım araçlarında kullanımının uygun olabileceği tespit edilmiştir (Ma and Hanna 1999).

2003 yılında yapılan başka bir çalışmada; Jatropha yağı %50 oranında dizel yakıt ile karıştırılarak kullanılmıştır. Sonuç olarak; bitkisel yağın direk veya karışım olarak uzun

sürekli kullanımının, yüksek viskozite, asit bileşenleri, doymuş yağ asit bileşenleri, oksidasyondan dolayı kurum oluşumu, depolama esnasındaki polimerizasyon, karbon birikimi, yağlama yağının kalınlaşması nedenlerinden dolayı uygun olmadığını tespit edilmiştir (Pramanik 2003).

Yapılan çalışmalara bakıldığında, özellikle sıvı yağın dizel ile karıştırılarak kullanılmasının çok düşük oranlarda (~%10-20) problem oluşturmayacağı ancak kullanılan oranın düşük olması nedeniyle de bu yöntemin alternatif yakıt kullanımı kapsamında çok etkili bir yöntem olmadığını göstermektedir.

2.2.2.b. Isıl işlem

Bir akışkanların viskozite değeri sıcaklığın artmasıyla azalır. Bu nedenle bir bitkisel yağın viskozite değerinin azaltılması amacıyla ısıtılarak kullanılması mümkündür. Ancak bitkisel yağların viskozite değer(ler)inin dizel yakıttan kat kat yüksek olması ve ısıtma işleminin belirli sıcaklık aralıklarında yapılabilmesi nedeniyle uygun ve kullanışlı bir metot değildir.

Silvico ve arkadaşlarının yapmış oldukları çalışmalarında bir dizel jeneratöründe kullanmak amacıyla ısıtılmış palm yağını kullanmışlardır. Dolgu oranındaki artmaya bağlı olarak egzoz gaz sıcaklığı ve efektif yakıt tüketiminin dizel yakıtla oranla arttığı, bunun yanında yükün artmasıyla; CO miktarı arttığı ve HC miktarının azaldığı tespit edilmiştir. Ayrıca palm yağının kullanımı sonucunda dizel yakıtla oranla daha düşük miktarda NO_x emisyonu elde edilmiştir (Ramadhas *et al.* 2004).

2.2.2.c. Piroliz

En genel olarak, bir maddenin ısı yardımıyla başka bir maddeye dönüşmesi işlemine Piroliz veya Termal Kraking denir. Büyük moleküllü yapılardan daha küçük moleküllü yapı elde etmek veya kimyasal zincirin parçalanmasını sağlamak için ısı gereklidir.

Piroliz kimyasını (reaksiyon oluşum şekillerini, reaksiyon ürünlerinin değişimi) tanımlamak zordur. Bitkisel yağlar, hayvansal yağlar, doğal yağ asitleri, yağ asitlerinin metil esterleri piroliz ile parçalanabilir. Yağların pirolizi özellikle petrol rezervlerinin olmadığı yerlerde uzun yıldan beri çalışma konusudur (Ma and Hanna 1999).

Bitkisel yağlar ya ısı etkisiyle kapalı bir kaptaki parçalanarak veya standart ASTM distilasyonu ile ısı parçalanmaya tabii tutularak iki farklı şekilde piroliz edilir (Altun ve Gür 2005).

Bitkisel yağların pirolizi sonucunda; karboksil asit, aromatikler, alkadienler, alkenler ve alkanları içeren gruplar oluşur. Farklı bitkisel yağlardan farklı gruplar oluşabilir. Soya yağının pirolizinden %79 karbon, %11,88 hidrojen oluşur (Srivastava and Prasad 2000).

Bitkisel yağlarının benzinli ve dizel yakıtın yerine kullanılabilmesi nedeniyle ilk piroliz işlemi, I. Dünya Savaşı'nda karşımıza çıkmaktadır. Çin'de yapılan ilk çalışmalar 1920'li yıllara kadar uzanmasına rağmen gelişimi özellikle savaşın patlak vermesi üzere, savaştan hemen önce yapılmıştır. 1947 yılında Chang ve arkadaşı Wan tarafından yapılan çalışmalarında tung yağının pirolizi incelenmiştir. Bu çalışma üç farklı aşamada yapılmıştır. (1) sebze yağlarının damıtılması ve buharının ayrıştırılması (2) katalizörlü veya katalizörsüz sebze yağlarının parçalanması (3) bitkisel yağdaki sabunun piroliz edilmesi. Çalışmada 1 ton sebze yağından 60 galon bitkisel-benzin, 0,73 ton bitkisel-dizel, 0,05 ton zift veya 60 galon bitkisel-benzin, 40 galon bitkisel-kerosen, 0,60 ton bitkisel-dizel ve 0,06 ton zift elde etmişlerdir (Chang and Wan 1947).

2.2.2.d. Mikro-emülsiyon

Mikroemülsiyon, normal bir şekilde karışmayan iki akışkan ve bir veya daha fazla iyonik (veya noniyonik) amfifilden o anda oluşan, genel olarak 1-150 nm boyutundaki optik izotropik akışkan mikro yapıların, kolloidal dengede dağılması olarak tanımlanır. Bu

metotta etanol, metanol ve 1-buthanol çözücü olarak kullanılmaktadır (Srivastava and Prasad 2000; Agarwal 2007).

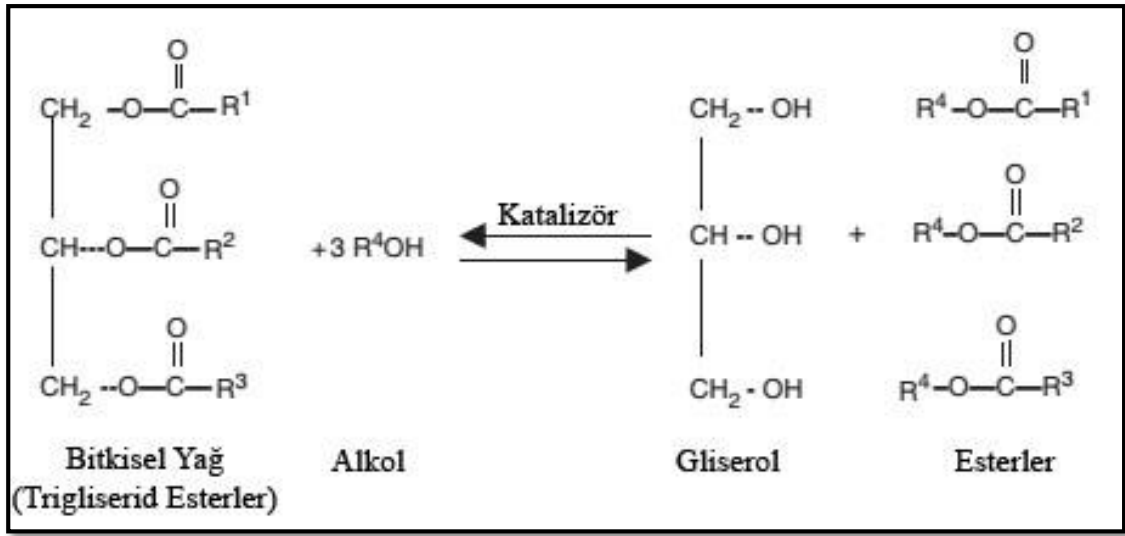
Yapılan bir çalışmada, soya yağındaki sulu ethanolün hem iyonik hem non-iyonik mikroemülsiyonlarının kısa zamanlı kullanımı sonucunda elde edilen motor performansının, No. 2 dizeline yakın olduğu tespit edilmiştir. Ancak bu yakıtların enerji içeriği ve setan sayısı çok düşüktür (Ramadhas *et al.* 2004).

2.2.2.e. Transesterifikasyon

Alkolleştirme olarak da bilinen transesterifikasyon işlemi, katı ve sıvı yağların alkol ile esterleştirilmesidir. Bu proses, çoğunlukla deterjan ve kozmetik sektöründe metil esterlerinin üretilmesi amacıyla kullanılmaktadır. Transesterifikasyon reaksiyonu; yağların yapısındaki trigliseridlerin, bir katalizör eşliğinde alkolle reaksiyona girmesiyle gerçekleşir. Reaksiyon Şekil 2.19.'da gösterilmektedir. Ester, hidrokarbon zincirinin başka bir moleküle bağlanmış halidir. Reaksiyonda, serbest kalan esterler alkolle, katalizör ise gliserinle birleşir. Bitkisel yağlar asit, alkol ve katalizör ise baz karakterlidir. Bu nedenle yağın bünyesinde bulunan yağlar, asit karakterli olduğu için yağ asidi olarak tanımlanır (Öğüt ve Oğuz 2006). Katalizör kullanımı, reaksiyon oranını ve oluşumunu sağlar. Reaksiyon tersinirdir yani ortamda fazla miktarda alkol bulunması durumunda reaksiyon ürünler yönüne döner (Ma and Hanna 1999; Agarwal 2007)

Transesterifikasyon işleminde ester oluşum miktarını etkileyen en önemli parametre, trigliserid-alkol oranıdır. Stokiyometrik denkliğe göre; bir mol trigliserid, üç mol alkollün reaksiyonundan üç mol yağ asit esteri ve bir mol gliserol elde edilmektedir (Ma and Hanna 1999). Alkolün ortamda %100 fazla olması, reaksiyonun miktarını maksimum yapar. Bu kapsamda 1984 yılında yapılan bir çalışmada; Freedman ve arkadaşları; soya yağı, ayçiçek yağı, yerbıstığı yağı ve pamuk yağının hammadde olarak kullanıldığı transesterifikasyon reaksiyonunda, farklı mol oranlarda (1:1 ve 6:1) alkol ile oluşan ester miktarlarını analiz ettiler. Sonuçta; en fazla dönüşüm miktarının 6:1 oranında olduğunu

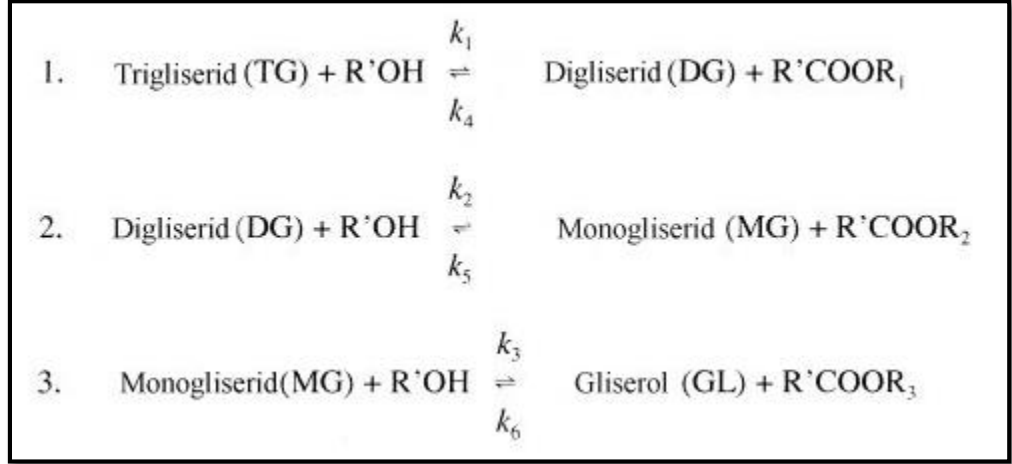
ve bu oran artırıldığında ise (6:1 den daha fazla) dönüşüm miktarının artmadığı belirttiler (Freedman *et al.* 1984; Agarwal 2007) Ayrıca transesterifikasyon reaksiyonu tersinir bir reaksiyondur. Ürünler yönünde gerçekleşen bir reaksiyonun girenler yönüne dönmemesi için ya ürünlerden birisinin ortamdan uzaklaştırılması veya ortamda fazla miktarda alkol olması gerekmektedir. Bu nedenle kullanılan alkol miktarı her zaman fazla tutulur (Srivastava and Prasad 2000).



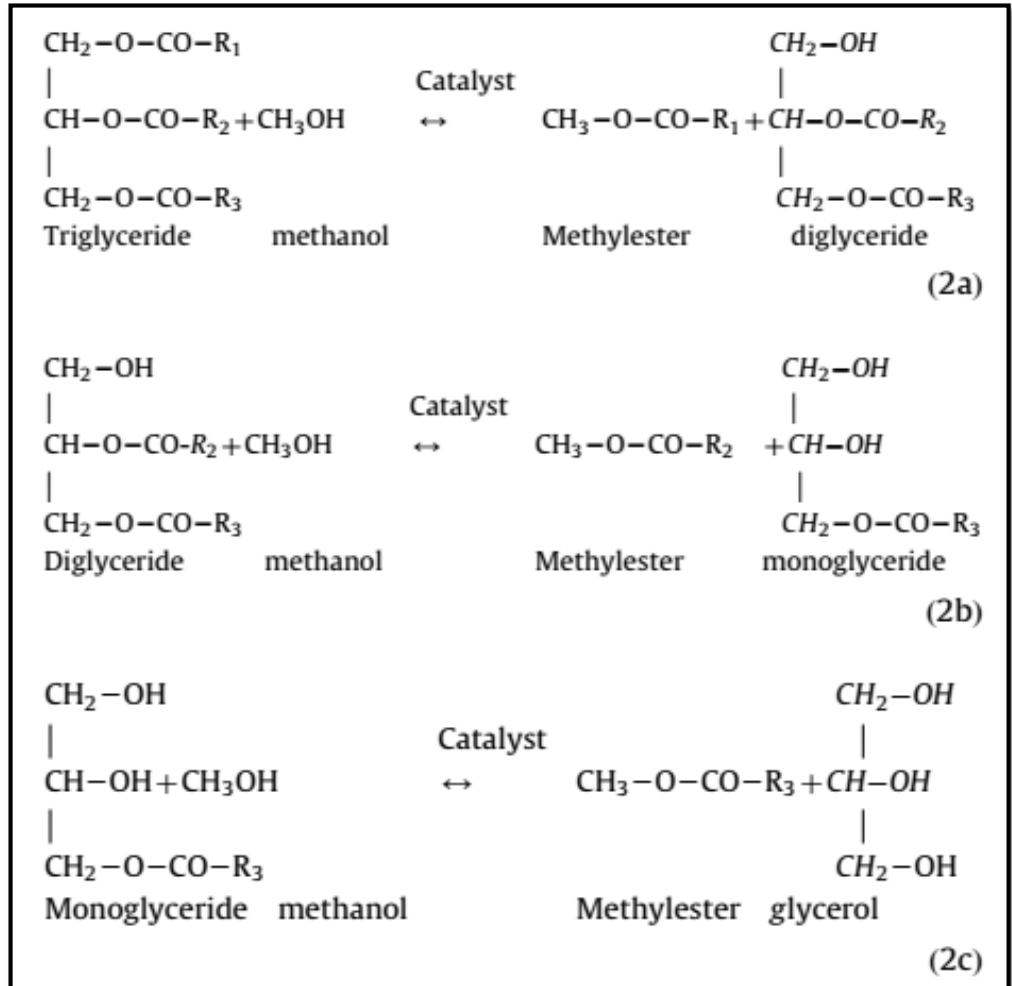
Şekil 2.19. Transesterifikasyon reaksiyonu

Transesterifikasyon işlemi, sıralı ve tersinir olan reaksiyonlardan oluşur. Triglyceridler kademeli olarak önce diglyceridlere, sonra monoglyceridlere en sonda gliserole dönüşür. Bu dönüşüm kademeleri Şekil 2.20’de gösterilmektedir. Her bir adımda bir mol ester, reaksiyon sonunda da üç mol ester oluşur (Ma and Hanna 1999).

(a)



(b)



Şekil 2.20. Transesterifikasyon reaksiyonun dönüşümü

* (a) Genel gösterim (Agarwal 2007), (b) Detay gösterim (Ramachandran et al. 2013)

Trigliseridlerin transesterifikasyonundan sonra; ester, gliserol, alkol, katalizör, tri-di-monogliseridlerin bulunduğu bir karışım elde edilir. Saf ester elde etmek kolay değildir. Çünkü monogliserid ve digliseridlerdeki gibi esterlerin içinde de kirletici maddeler vardır. Monogliseridler esterlerde bulanıklığa (kristalleşmeye) neden olurlar. Kirlilikler, akma ve bulutlanma noktasının artmasına neden olur. Doymuş yağ asit esterleri, akma ve bulutlanma noktası sıcaklık değerlerini artırır. Yağ asitlerinin metil esterleri, mono-di-trigliseridlerin kaynama noktası ve erime noktası, karbon zincirindeki atomların sayısı arttığı için artar, çift zincir sayısındaki artış ile azalır. Ayrıca mono-di-trigliseridlerin erime noktası, hidrojen zinciri ve moleküllerin polarlığından dolayı artar (Ma and Hanna 1999).

Transesterifikasyon işlemi sonunda reaksiyona girmeden kalan çok az miktardaki (50.000-100.00 ppm civarında) alkol, sahip olduğu enerji değerine rağmen ortamdan uzaklaştırılması gerekir. Böylece, biyodizelin parlama noktası sıcaklığını ve setan sayısını düşürmesi engellenerek, sentetik esaslı malzemelerden üretilen yakıt hattı korunmuş olur.

Avrupa ve ABD’de biyodizel üretmek amacıyla kullanılan reaksiyon olarak tanımlanan transesterifikasyon reaksiyonunun kalitesini veya dönüşüm oranını;

- Kullanılan alkol çeşidi ve miktarı,
- Katalizör çeşidi ve miktarı,
- Reaksiyon zamanı
- Reaksiyon sıcaklığı belirler.

Transesterifikasyon reaksiyonunda alkol çeşidi ve miktarı: Transesterifikasyon reaksiyonunda alkol olarak; metanol (metil alkol), etanol (etil alkol), propanol, butanol ve amyl alkol kullanılabilir. Metanol ve etanol bunlar arasında çok kullanılan alkollerdir. Özellikle metanol; düşük maliyeti, kimyasal ve fiziksel özellikleri (en kısa zincirli alkoldür ve polar yapısına sahiptir) nedeniyle yoğun kullanım alanına sahiptir. Ayrıca, trigliseridler ile hızlı reaksiyona girer ve NaOH, KOH içerisinde kolayca çözülür olması

nedeniyle etanolden daha fazla tercih edilir. Ancak artan etanol üretimine bağlı olarak etanolün fiyatındaki azalma, etanol kullanılarak biyodizel üretimin yakın gelecekte ön plana çıkaracağı değerlendirilmektedir (Hamelinck *et al.* 2007).

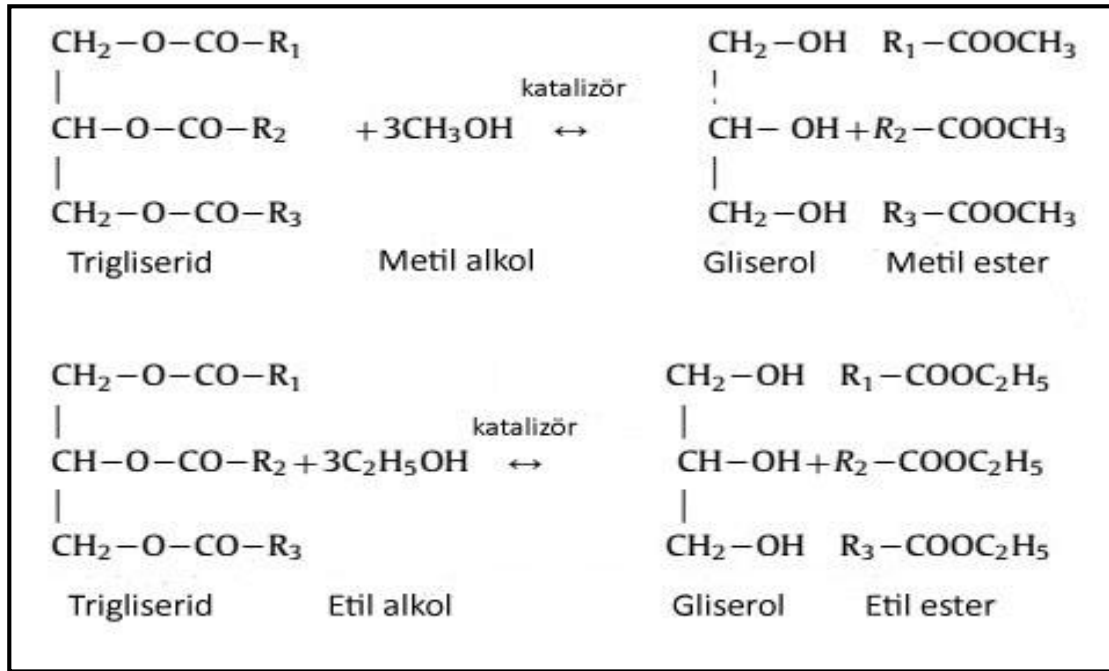
Transesterifikasyon metodunda alkol olarak kullanılan metanol ve etanol, aynı zamanda biyokütle kaynaklarından elde edilen iki alternatif yakıttır. Metanol; kömür ve petrol kökenli yakıtlardan düşük maliyetle üretilmesine rağmen, dizel yakıtta çözünmesi kısıtlayıcı bir özelliktir. Etanol; bitkilerdeki şekerin, alkol fermentasyonu ile üretilen, biyokütle temelli yenilenebilir bir yakıttır. Oksijen bileşeni yüksek (%35) olduğu için, oksijenleştirme maliyeti düşüktür. Dizel yakıtlarda etanolün kullanımı, araçlardaki partikül emisyonlarını azaltmak açısından önemli bir yere sahiptir. Alkoller düşük setan sayısı, düşük ısı değeri, düşük alevlenme noktası ve dizel yakıtlardaki yetersiz (fakir) çözünürlüğü ve yetersiz yağlama özelliklerinden dolayı, dizel motorlarda direk olarak kullanılamazlar. Alkolün dizel ile karışım niteliğini ve miktarını artırmak için, biyodizel seyreltici veya surfaktan olarak kullanılır. Bu nedenle alkol-biyodizel-dizel hibrit yakıtları ile karşılaşılmaktadır (Rajasekar *et al.* 2010).

Alkol olarak metil alkol kullanılan transesterifikasyon metodunda, elde edilen esterler yağ asit metil esteri (YAME), etil alkol kullanılarak elde edilen esterler ise yağ asit etil esteri (YAEE) olarak isimlendirilmektedirler. YAEE ile YAME karşılaştırıldığı zaman kimyasal özelliklerinin birbirine çok benzediği görülmektedir. Her iki durumda da, işlem teknolojisi, hammadde, alkol, katalizör aynı olmasına rağmen, EN 14214 e göre kalite parametrelerinde bazı farklılıklar tespit edilmiştir. YAEE değerleri YAME ile EN 14214 Standartları kapsamında incelendiği zaman;

- Viskozite; YAME'den önemli bir şekilde büyüktür. Birçok YAEE'nin viskozite değeri EN 14214 sınırından düşük olmasına rağmen, bazı YAEE viskozite değeri bu değer çok daha üstündedir.
- Yoğunluk; YAME'den az (veya ihmal edilecek kadar fazla). Ancak bu değer standart sınırları içindedir.
- Parlama noktası sıcaklığı; YAME'den daha yüksektir. Ancak bu durum biyodizel üretiminden sonra etanolün uzaklaştırılma işlemine bağlıdır.

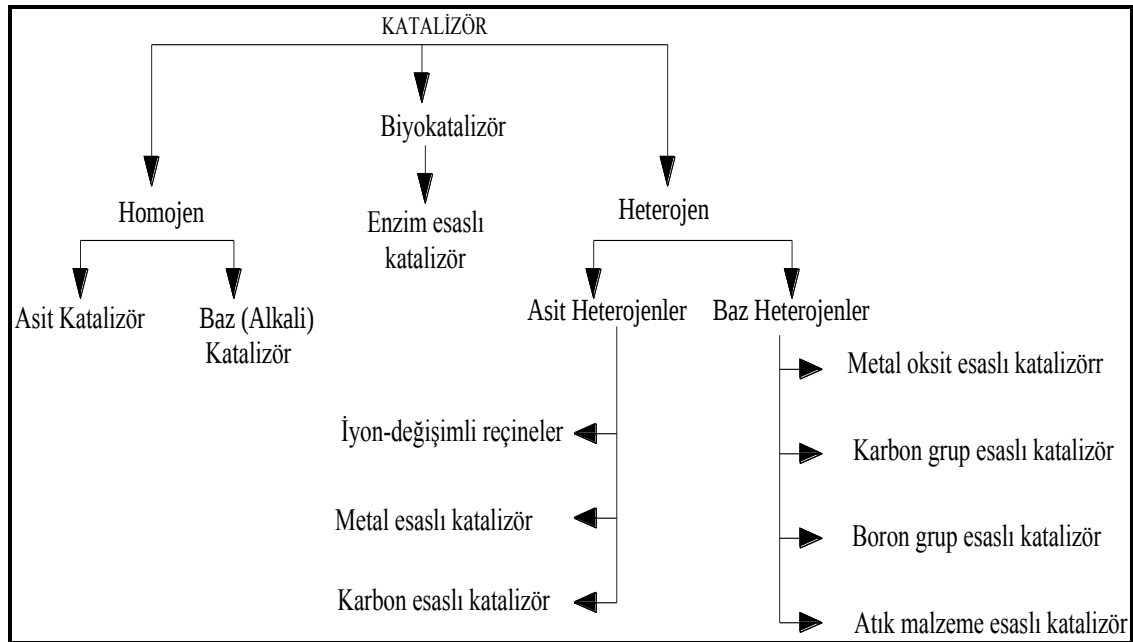
- Damıtma karakteristikleri; Etil esterlerin yüksek kaynama noktasından dolayı, YAME'den farklıdır. Bu parametre Avrupa Standartları için önemli olmamasına rağmen diğer ulusal standartlarda (örneğin ABD) yer almaktadır.
- Karbon artığı; YAME'den çok az yüksektir ancak verilen standartlar içindedir.
- Oksidasyon kararlılığı; Bu parametreyi karşılaştırmak için çok fazla parametre olmamasına rağmen, eldeki verileri göre YAEE daha yüksek oksidasyon kararlılığına sahiptir.
- Düşük sıcaklık davranışı; Bu kısımdaki veriler yeterli olmamakla birlikte, YAEE'nin düşük sıcaklıklarda daha iyi davranışlara sahip olacağı tahmin edilmektedir (Hamelinck *et al.* 2007; Bozbas 2008).

Metil alkol ve etil alkol ile gerçekleştirilen transesterifikasyon reaksiyonu arasındaki yapısal farklılık Şekil 2.21'de görülmektedir (Ramachandran *et al.* 2013).



Şekil 2.21. Metil alkol ve etil alkol reaksiyon farkı

Transesterifikasyon reaksiyonunda katalizör çeşidi ve miktarı: Katalizörlerin sınıflandırılması Şekil 2.22’de görülmektedir. Biyodizel üretiminde genel olarak homojen katalizörler kullanılmaktadır. Homojen katalizörlerin heterojen katalizörlere göre dezavantajı, hidroskopik yapısı ve çevreye vermiş oldukları zarardır. Diğer taraftan heterojen katalizörler çok yavaş olmalarına rağmen daha ekonomiktirler. Biyodizel üretimi amacıyla transesterifikasyon reaksiyonunda genel olarak homojen katalizörler kullanılmasına rağmen, heterojen katalizörler ile ilgili yapılmış bir çalışmayla karşılaşmak mümkündür. Şimdi yaygın kullanım alanına sahip olan homojen katalizörleri karşılaştırmalı olarak inceleyelim (Ramachandran *et al.* 2013; Mofijur *et al.* 2013)



Şekil 2.22. Katalizörlerin sınıflandırılması

Baz (Alkali) Katalizörler: Reaksiyon süresini daha kısa zamanda tamamlaması ve reaksiyon için gerekli miktarın daha az olması nedeniyle diğer katalizörlere göre daha yaygın bir kullanım alanına sahiptir (Lin and Lin 2007a). Geniş kullanım alanının sebeplerinden biriside maliyetinin daha düşük olmasıdır (Lin and Lin 2008). Sodyum hidroksit (NaOH), potasyum hidroksit (KOH) ve sodyum metoksit (CH₃ONa) alkali katalizör sınıfında en yaygın kullanılan katalizörlerdir (Lin and Lin 2007b).

Alkali katalizörlü transesterifikasyon işleminde; suyun bulunması serbest yağ asitlerine oranla, daha kritik öneme sahiptir. Gliseridlerin alkali katalizörler ile transesterifikasyon reaksiyonu yapılabilmesi için, gliseridlerin asit değerlerinin 1'den daha düşük olması ve kullanılan bütün malzemelerin susuz (kuru) olması gerekmektedir. Şayet asit değeri 1'den büyükse, serbest yağ asitlerinin nötrlenebilmesi için daha fazla NaOH kullanılması gerekir. Ayrıca suyun bulunması durumunda, su sabun formuna dönüşür ve bu dönüşüm esnasında bir miktar daha katalizör kullanır. Bu durumda daha fazla ester elde edebilmek ve katalizörün etkinliğinin azaltılmasını engellemek için, daha fazla alkali katalizör kullanılması gerekir. Ayrıca ortamda oluşan sabun, jelleşmeye neden olacağı için viskoziteyi artırır ve gliserolün ayrılmasını zorlaştırır (Ma and Hanna 1999).

Alkali katalizörler, ağırlığın %0,5-1 oranlarında kullanılarak %94-99 oranında dönüşüm sağlayabilirler. Katalizör miktarındaki artış, dönüşüm miktarını artırmaz. Katalizörün fazla kullanılması, hem kullanılan katalizörün zayii olmasına, hem de ürünler içinde katalizör bulunmasına neden olur ki, her iki durum da istenen bir durum değildir (Agarwal 2007).

Asit Katalizörler: Serbest yağ asit oranı (ağırlık olarak) %0,5 ve su bileşeni (ağırlık olarak) %0.06'dan daha fazla olan bitkisel yağların transesterifikasyon işleminde, eğer alkali katalizör kullanılırsa reaksiyon sonunda önemli miktarda sabun elde edilir. Bu durumda sabun oluşumunu engellemek amacıyla asit katalizör kullanılır. Asit katalizörü ile reaksiyon çok daha uzun sürede tamamlanır ancak reaktant karışımındaki büyük dalgalanmaları tolere edilir. En yaygın kullanılan asit katalizörleri; hidroklorik asit, fosforik asit, sülfürik asit, sulfonik asittir (Lin and Lin 2007b).

Yağ/katalizör oranı, kullanılan katalizörün tipine göre değişir. Aynı reaksiyon süresinde aynı oranda ester elde edebilmek için kullanılan asit katalizör miktarı, alkali katalizör miktarından kat kat fazla olmalıdır. Bu konuyla ilgili Freedman ve arkadaşlarının 1986 yılında yapmış oldukları bir çalışmada; soya yağının transesterifikasyonu için 30:1 oranında asit katalizör kullanılırken, aynı zamanda aynı oranda ester elde etmek için alkali katalizörden 6:1 oranında kullanılmıştır. Daha yüksek molar oranda alkol kullanımı daha

kısa zamanda ve daha fazla miktarda ester oranına neden olur (Freedman *et al.* 1986; Ma and Hanna 1999). Ayrıca alkali katalizörler, endüstriyel ekipmanlarda daha az korozyon etkisiye neden olduğu için asit katalizörlerden daha fazla tercih edilirler (Agarwal 2007).

Enzimler; Enzim kullanılarak biyozideli üretilmesi, daha yüksek üretim maliyetine hem de daha düşük dönüşüm oranına sebep olur. Bu nedenle tercih edilen bir yöntem değildir (Lin *et al* 2006; Lin and Lin 2007b)

Biyodizel üretiminde kullanılacak hammaddenin, serbest yağ asit oranı reaksiyon sonucu açısından (dönüşüm oranı) önemli bir parametredir. Örneğin; kullanılmış atık kızartma yağının serbest yağ asit oranı, kullanılmamış yağa göre daha fazladır. Serbest yağ oranının fazlalığı, bitkisel yağın jelleşme sıcaklığını artırır. Bu nedenle biyodizel üretiminde serbest yağ asitlerinin ortadan kaldırılması önemli bir ihtiyaçtır. Kullanılmış kızartma yağının serbest yağ asit oranı kullanılmamış yağa göre daha fazla olduğu için nötralizasyon amacıyla daha fazla miktarda katalizör kullanılması gerekmektedir (Öğüt ve Oğuz 2006).

Transesterifikasyon reaksiyon süresinin etkisi: Transesterifikasyon reaksiyonun süresi, reaksiyon dönüşüm oranını (esterlerin oluşum miktarını) etkileyen önemli bir parametredir. Reaksiyon zamanının artırılması, dönüşüm oranını artırır. Yapılan bir çalışmada; fıstık, ayçiçeği ve soya yağı transesterifikasyonu incelenmiştir. 60°C reaksiyon sıcaklığında, 6:1 molar oranda alkol (metil alkol) ve %0,5 kütleli oranda katalizör (sodyum hidroksit) kullanarak başlatılan reaksiyonda, başlangıçtan 1 dakika sonra soya yağı ve ayçiçeği yağlarının %80 oranında dönüştüğü ve 60 dakika sonra tüm yağların %93-98 oranında dönüştüğü tespit edilmiştir (Ma and Hanna 1999).

Transesterifikasyon reaksiyon sıcaklığının etkisi: Transesterifikasyon reaksiyon kalitesine direkt etki eden diğer bir parametredir reaksiyon sıcaklığıdır. Reaksiyon sıcaklığının reaksiyon üzerine etkisi incelendiği zaman reaksiyonda kullanılan alkolün buharlaşma sıcaklığı (bitkisel yağların buharlaşma sıcaklığı her zaman çok yüksektir)

dikkate alınmalıdır. Freedman ve arkadaşlarının 1984 yılında yapmış oldukları çalışmalarında, hammadde olarak soya yağı kullandıkları biyodizel üretiminde, 1:6 molar oranında metil alkol ve %1 oranındaki sodyum hidroksit ile farklı sıcaklıklarda (60-45-32 °C) 60 dakika süreyle transesterifikasyon reaksiyonu gerçekleştirmişlerdir. İşlem sonucunda elde edilen biyodizel numunelerinin dönüşüm oranları analiz edildiğinde, dönüşüm oranlarının sırasıyla %94, 87 ve 64 olduğu tespit edilmiştir (Freedman *et al.* 1984; Ma and Hanna 1999). Reaksiyonunun yüksek basınç (9000 kPa) ve yüksek sıcaklıkta (240°C) de gerçekleştirilmesi durumunda, hem esterleşme hem transesterifikasyon işlemi aynı anda gerçekleşmektedir (Srivastava and Prasad 2000).

2.3. Biyodizel

Yağlarının, dizel motorlarda yakıt olarak kullanılabilmesi için en iyi çözüm, onları biyodizele dönüştürmektir. Biyodizel; yenilenebilir kaynaklardan elde edilen, yeni veya kullanılmış bitkisel veya hayvansal yağların, kimyasal prosesler yardımıyla mono-alkali ester temelli oksijenleştirilmiş yakıtına verilen isimdir (Agarwal 2007).

Biyodizel, Amerikan Topluluğu (ASTM-American Society for Testing and Materials) tarafından “dizel motorlarda kullanım amacıyla hayvansal yağlar veya bitkisel yağları gibi yenilenebilir lipid besin kaynaklarından üretilen, uzun zincir yağ asitlerinin mono alkalın esterleri” olarak tanımlamaktadır (Rajasekar *et al.* 2010).

Biyodizelin karakteristik özellikleri, dizel yakıtı çok benzediği için dizel motorlarda kullanılır. Biyodizel herhangi bir petrol ürünü içermez ve petrol dizel ile karıştırıldığında, kararlı bir dizel+biyodizel karışımı oluşturur. Bu karışımlar BX şeklinde tanımlanır. Buradaki X değeri, karışımdaki biyodizelin yüzdesel miktarını gösterir. Örneğin B20 karışımında; %20 oranında biyodizel %80 oranında dizel, B50 de %50 biyodizel %50 dizel, B100 de ise %100 biyodizel %0 dizel bulunmaktadır (Agarwal 2007).

Biyodizel; yüksek kalitedeki çözünürlüğü, düşük orandaki zehirlilik etkisi, yüksek yağlama özelliği, düşük emülsiyon değerleri nedeniyle iyi bir yakıttır. Biyodizelin yanması sonucunda, petrol kökenli dizel yakıtla oranda daha az miktarda polisiklik aromatik hidrokarbon (PAH), nitratlanmış polisiklik hidrokarbon (nPAH) ve partikül madde (PM), CO₂, CO, HC, SO_x oluşmaktadır. Biyodizelin yakın gelecekte petrol rezervlerinin tükenmesi nedeniyle oluşabilecek enerji krizini engelleyeceği düşünülmektedir (Lin and Lin 2008).

Etanol-metanol gibi alkoller, bitkisel yağlar ve biyodizel önemli miktarda (yaklaşık %10) oksijen bileşenine sahip oldukları için bunlara oksijenleştirilmiş yakıtlar denilmektedir. Bunlar biyokütle kaynaklarından üretilir, çevreyle dost, geri dönüşümlü ve sürdürülebilir niteliktedirler. Motorlu taşıtlarda fosil yakıtlara alternatif olarak sunulan oksijenli yakıtların kullanımı, bazı çevresel problemlerin çözümüne yardımcı olacak, sera gazı emisyonlarının azaltılmasını sağlayacaktır. Oksijenleştirilmiş yakıtlar, yapılarındaki sülfür gibi kirleticilerin düşük miktarlarda olmasından dolayı, bilinen geleneksel yakıtlardan daha düşük oranlarda kirlilik üretirler (Rajasekar *et al.* 2010).

Biyodizelin yüksek yağ oranı yanma veriminin artmasına, PM, CO ve diğer kirliliklerin azalmasına sebep olurken aynı zamanda NO_x artmasına neden olmaktadır. Saf biyodizelin yüksek oksijen bileşiğinden dolayı (petrol dizelinden yaklaşık %10) daha fazla NO_x oluşumuna neden olmaktadır (Lin and Lin 2007a; Lin and Lin 2007b; Lin and Lin 2008).

Biyodizel üretimi ve kullanımı tüm dünyada artan bir hızla devam etmektedir. Dünyadaki biyodizel potansiyeli Çizelge 2.7’de görülmektedir (Atabani *et al.* 2012).

Biyodizelin bitkisel yağdan üretiliyor olması ve bitkisel yağın ilk defa Rudolf Diesel tarafından 10 Ağustos 1900 yılında yakıt olarak kullanılmasına istinaden tüm dünyada “10 Ağustos Dünya Biyodizel Günü” olarak kabul edilmiştir. Bu gün, 2005 yılından itibaren Türkiye’de de kutlanmaktadır (Öğüt ve Oğuz 2006).

Çizelge 2.7. Dünya biyodizel potansiyelleri

S. Nu.	Ülke	Biyodizel Potansiyeli	Maliyet (\$/Lt)
1	Malezya	14.540	0,53
2	Endonezya	7.595	0,49
3	Arjantin	5.255	0,62
4	USA	3.212	0,70
5	Brazilya	2.567	0,62
6	Hollanda	2.496	0,75
7	Almanya	2.024	0,79
8	Filipinler	1234	0,53
9	Belçika	1213	0,78
10	İspanya	1.073	1,71

Biyodizel bir dizel yakıtı olmanın dışında; model uçaklarda, kalorifer kazanlarında, yapışkan, kimyasal ve spreylere boyaların temizlenmesinde çözücü olarak, motor parçalarındaki yağ ve kurumun temizlenmesinde, çok amaçlı makine yağlayıcısı olarak, tuğla üretimi ve çömlekçilikte, araziye veya suya kazara dökülen petrolün temizlenmesinde, jeneratörlerde yakıtı olarak, inşaat kalıplarının sıvanmasında, hidrolik sıvısı, demiryolu yağlayıcısı olarak çeşitli alanlarda hizmet vermektedir (Öğüt ve Oğuz 2006).

2.3.1. Biyodizelin faydaları

- Dizel motorda herhangi bir modifikasyon gerektirmez. Biyodizelin fiziko-kimyasal özellikleri dizel yakıtı çok benzediği için dizel motorlarda direk kullanılır. Herhangi bir modifikasyon gerektirmez.
- Yağlayıcıdır. Biyodizelin yapısında bulunan yağ molekülleri nedeniyle özellikle pompa ve enjektör gibi hareketli akşamlarda yüksek yağlama özelliği sağlar.

- Zehirsizdir. Doğal yapısında kükürt bulunmadığı için zehirli bir yakıt değildir ve doğada kolayca ayrışabilir.
- Yanma verimi yüksektir. Biyodizel yaklaşık %10 oranında oksijen içermektedir. Yapısındaki oksijen, daha etkin yanma sağlar. Bu nedenle yanma verimi dizel yakıttan daha yüksektir.
- Bağımsız ve ekonomik bir yakıttır. Biyodizel petrol kökenli bir yakıt değildir. Bitkisel yağlardan elde edilir. Bu nedenle biyodizel kullanan ülkeler, hammaddelerini yetiştirerek biyodizel üretimini kendileri yapabilirler. Bu durum hem ülkelerin enerji dış bağımlılığını ortadan kaldıracak hem de oluşturacağı iş istihdamı nedeniyle ülke ekonomisine katkı sağlayacaktır.
- Daha güvenlidir. Biyodizelin parlama noktası sıcaklığı (120-170°C), dizel yakıtın sıcaklığından (50-80°C) daha yüksek olduğu için depolanması ve taşınması daha kolay, daha güvenlidir.
- Yanma emisyonları düşüktür. Dizel yakıta oranla daha etkin bir yanma sağlamış olması ve CO₂ çevriminde etkin rol alması (bitkisel yağ üretimi nedeniyle) dizel yakıta oranla daha az emisyon üretir (Rajasekar *et al.* 2010).

2.3.2. Biyodizelin Sakıncaları

- NO_x emisyonunu artırır. Biyodizelin bilinen en önemli dezavantajıdır. Biyodizelin setan sayısı, dizel yakıtlardan düşüktür. Setan sayısı azalınca, TG zamanı artar, yanma odasında yakıt birikir ve yanma sonucu sıcaklık artar. Bu nedenle NO_x emisyon miktarı da artar. Bu miktar yapılan bir çalışmada, B20 karışımı için %3'den küçük olarak tespit edilmiştir (Dunn 2005).
- Isıl enerjisi düşüktür. Biyodizelin birim ısı değeri, dizel yakıttan yaklaşık %10 daha düşüktür. Bu nedenle aynı miktar yakıt tüketiminde, dizel yakıta oranla daha düşük güç elde edilir.
- Yakıt tüketimi fazladır. Biyodizelin birim ısı değeri düşük olduğu için, aynı gücün elde edilebilmesi için daha fazla yakıt tüketimi olur.

- Soğukta akma zorluğu vardır. Biyodizelin akma noktası sıcaklığı ve bulutlanma noktası sıcaklığı dizel yakıttan çok yüksektir. Bu nedenle, biyodizel düşük sıcaklıklarda ($-5^{\circ}\text{C} \dots +2^{\circ}\text{C}$) kristalleşmeye başlar, yakıt boru hattında, filtrelerde tıkanmalara neden olur (Rajasekar *et al.* 2010).

Özellikle B100 kullanım durumunda conta, hortum ve bağlantı elemanlarının uygun malzeme ile değiştirilmesi gerekmektedir (Öğüt ve Oğuz 2006).

2.3.3. Biyodizelin fiziko-kimyasal özellikleri

Avrupa da biyodizelin fiziko-kimyasal özellikleri “EN 14214 Dizel Motorlar İçin Otomotiv Yakıtlar ve Yağ Asit Esterleri (FAME) Değer” Avrupa Standartı ile tespit edilmektedir. Standart değerleri ve test yöntemi Çizelge 2.8’de gösterilmektedir (Chuepeng 2011).

Biyodizel doğası gereği, sülfür içermez. Ancak depolama ve çoğunlukla transesterifikasyon işlemi esnasında sülfür bileşenleri bulunabilir. Biyodizelin diğer bazı fiziksel özellikleri, viskozite, yoğunluk, sıkıştırılabilirlik (modül katsayısı) gibi dizel motordaki yanma karakteristiklerini etkiler. Çizelge 2.8’de görülmeyen “sıkıştırılabilirlik modülü” biyodizellerde daha büyüktür. Daha büyük olması demek, atomizasyonun daha iyi olması ve daha küçük boyutta yakıt damlalarının elde edilmesi demektir. Bu değer çoğunlukla, enjeksiyon basıncının bir fonksiyonudur ve biyodizeli yakıtlı, yakıt sistemindeki enjektörlerdeki basınç aynı pompa zamanlamasında daha hızlı olabilir ve dağıtılır (Chuepeng 2011).

Çizelge 2.8. EN 14214 Avrupa Standartı

Özellik	Birim	Alt Değ.	Üst Değ.	Test Metodu
Viskozite (40 C°)	mm ² /s	3.50	5.00	ISO 3104
Parlama Noktası	°C	120	-	ISO 3679
Sülfat Külü	%	-	0.02	ISO 3987
Setan Sayısı	-	51.0	-	ISO 5165
Artık Karbon	%	-	0.30	ISO 10370
Asit Değeri	mg.KOH /gr	-	0.50	ISO 14104
Gliserol	%	-	0.25	ISO 14105
Oksidasyon kararlılığı (110°C)	H	6.0	-	ISO 14112
Sülfür	mg/kg	-	10.0	ISO 20846/84

Bitkisel yağlar su içermezler, ancak üretim ve depolama esnasında su karışabilir. Yakıtların belirli miktarda su içermeleri dezavantaj değildir. Uygun özellikteki su/yakıt emülsiyon oranı, yanma sıcaklığı azalacağı için NO_x emisyonunda da azalmaya neden olacaktır. Ancak yüksek basınçlı enjeksiyonlu sistemlerde su yakıttan ayrılacağı için suyun korozyon etkisi meydana gelecektir.

2.3.3.a. Viskozite

Biyodizelin yüksek viskozitesi ve fakir uçuculuğu (buharlaşması) nedeniyle atomizasyon ve yakıt hava karışımı olumsuz etkilenir. Bunun sonucunda, fiziksel tutuşma gecikmesi artar. Daha uzun tutuşma gecikmesi, daha fazla yakıt enjekte edilmesine ve yanma için ön hazırlıkların uzamasına neden olur (Canakci *et al.* 2009). Yüksek viskozite, özellikle uzun süreli kullanımlar için problem teşkil eder. Biyodizelin kinematik viskozitesi ASTM D6751 için 1,9-6,0 mm²/s, EN 14214 için 3,5-5,0 mm²/s olarak tanımlanmıştır (Knothe 2005). Standartlara göre viskozite değerleri Çizelge 2.9'da gösterilmektedir (Chuepeng 2011).

Çizelge 2.9. Ağır dizel motorlar için Avrupa Emisyon Standartları

Yakıt	Standart	Bölge	Method ^a	Kinematik Viskozite (mm ² /s)
Petro-dizel	ASTM D975	ABD	ASTM D445	1.9-4,1 ^b
Biyodizel	ASTM D6751	ABD	ASTM D445	1,9-6,0
Petro-dizel	EN 590	Avrupa	ISO 3104	2,0-4,5
Biyodizel	EN 14214	Avrupa	ISO 3104	3,5-5,0

Viskozite, zincir uzunluğu (karbon atomlarının sayısı) ve doyma derecesinin artması ile artar. Esterlerdeki dallanmanın viskozite üzerine etkisi yok veya çok azdır. Metil ve etil esterlerine oranla, yağ asitlerinin viskozite değeri üzerine etkisi daha fazladır. Çift bağların şekli, viskoziteyi etkiler. Örneğin; cis çift bağ şekli, trans çift bağ şeklinden daha düşük viskoziteye sahiptir. Oksidasyon artması ile viskozite artar. Çünkü oksidasyon prosesi trans'tan cis'e çift zincirlerin izomerizasyonuna ve serbest yağ asitlerinin oluşmasına neden olur (Jain and Sharma 2010).

2.3.3.b. Setan sayısı

Yağ asit alkali esterlerin dizel yakıt olarak uygun olup olmadığını tanımlanmak için setan sayısına bakılır. Bu esterler, yüksek setan sayısına sahip hegzadekan gibi uzun hidrokarbon zincir yapısı ve düz zincir alkenlerine sahiptirler (Knothe 2005). Tarihte ilk setan testleri, hurma yağı etil esteri ile yapılmıştır (Knothe *et al.* 2003).

Dizel motorla da setan sayısı arttıkça, NO_x emisyonları azalmaktadır. Biyodizellerde setan sayısı ile NO_x emisyonu arasındaki ilişkiyi inceleyen Ladommatos ve arkadaşlarının 1996 yılında yapmış oldukları çalışmada; setan sayısının artırmak amacıyla katkı maddesi ilave etmişler, sonuçta biyodizelin yanması sonucu NO_x emisyonlarının azalmadığı aksine arttığı tespit etmişlerdir (Ladommatos *et al.* 1996). Yağ asit esterleri ile emisyon değişimleri incelendiğinde, biyodizelin yapısındaki doymamış yağ asit sayısındaki artma ve zincir uzunluğundaki kısalma; NO_x emisyonunu

arttırırken partikül emisyonunda her hangi bir değişme neden olmamaktadır. Doymuş yağ bileşenleri daha yüksek setan sayısına sahiptir. Ayrıca setan sayısı ve emisyonlar arasındaki ilişki motorun gelişmişliğine bağlıdır. Setan sayısı açısından hassas olan düşük enjeksiyon basınçlı motorlarda setan sayısı arttıkça; tutuşma gecikmesi kısalır, ortalama yanma sıcaklığı düşer ve bunun sonucunda NO_x emisyonları azalır. Ancak enjeksiyon sistemli modern motorlarda, enjeksiyon oranı setan sayısına çok bağlı değildir (Knothe 2005).

Yağ asit esterlerinin setan sayısı ile TG arasında non-lineer bir ilişki vardır. Bu ilişki; Ignition Quality Tester TM (IQTTM) göre;

$$CN_{IQT} = 83,99 \times (ID - 1.512)^{-0.658} + 3.547 \quad (22)$$

şeklinde tanımlanmaktadır. Setan sayısı üzerine, tutuşma gecikmesindeki küçük değişmelerin etkisi, büyük değişmelerin etkisinden daha fazladır (Knothe *et al.* 2003).

Tahmini setan sayısının hesaplanması amacıyla yapılan bir çalışmada bir çok çalışmadaki veriler kullanılarak bir ampirik formül elde edilmiştir. Bu çalışma; Multi Lineer Regresyon (MLR) tekniği kullanılarak setan sayısı tespiti yapılmıştır. Çalışmada R²=0,9191'dir.

$$\begin{aligned} CN = & 56,16 + 0,07.La + 0.1.M + 0.15.P - 0.05.Pt + \\ & + 0.23.S - 0.03.O - 0.19.Li - 0.31.Ln + \\ & + 0.08.Ei + 0.18.Er - 0.1.Ot \end{aligned} \quad (23)$$

Bu eşitlikte biyodizelin asit bileşen değerleri kullanılmıştır. La laurik, M myristik, P palmitik, Pt palmitoleik, S stearik, O oleik, Li linoleik, Ln linolenik, Ei eikosanik, Er eruik ve Ot ise diğer yağ asitlerinin karışımındaki yüzdesel oranlarını göstermektedir (Piloto-Rodríguez *et al.* 2013).

2.3.3.c. Soğuk akış

Biyodizelin kullanımı yönündeki en büyük engel soğukta çalışma problemidir. Çünkü biyodizel yüksek akma-bulutlanma sıcaklığına sahiptir. Genellikle bulutlanma sıcaklığı, akma sıcaklığından yüksek olduğu için akma sıcaklığında, bulutlanmadan kaynaklanan kristalleşme ve katılaşma görülür. Katılaşma ve kristalleşme hızlı bir şekilde oluşur, birikir ve yakıt borularının, filtrelerin tıkanmasına neden olur. Bunun sonucunda motorda çalışma problemi oluşur (Knothe 2005).

CP, PP, LTFT ve CFPP değerleri dizel ile biyodizel arasındaki ayırt edici özelliklerdir. Doymuş yağ bileşenleri, doymamış yağ bileşenlerinden daha yüksek erime noktasına sahiptir ve bunların karışımı da yine doymamıştan daha yüksek sıcaklıkta kristalize olur. Biyodizel, önemli miktarda doymuş yağ asitleri içeren yağlardan üretildiği için akma ve bulutlanma noktaları daha yüksektir (Knothe 2005).

Biyodizelin yüksek olan akma-bulutlanma sıcaklığını azaltmak amacıyla katkı maddeleri kullanılabilir. Bu işleme kışlaştırma denir. Bu metot, esterlerin soğuyunca oluşan katı formunu filtre ederek CP ve PP sıcaklıklarının düşürülür. Doymuş yağ bileşenleri daha yüksek setan sayısına sahiptir (Knothe 2005).

2.3.3.d. Isıl değeri

Fosil yakıtların en büyük özelliklerinden biride sahip oldukları yüksek kimyasal enerjileridir. Bir akışkanın (yağ, biyodizel vs.) alternatif olup olmayacağına karar verebilmek için ısı enerjisi değerine bakılır. Biyodizelin ısı enerjisi (yapısındaki %10 oksijen bileşeni nedeniyle ısı değeri, dizel yakıtı oranla %10 daha düşük) dizel yakıtlara çok yakındır. Ancak biyodizelin yakıt özelliklerini iyileştirmek mümkündür.

Biyodizelin düşük ısı verimini artırmak amacıyla yapılan çalışmalardan birisi de, üretilen biyodizeli, peroksidasyon işlemine tabii tutmaktır. Lin ve arkadaşların 2006 yılında

yapmış oldukları bir çalışmada; soya yağından ürettikleri biyodizel numunesine ağırlıkça %50 petrol eteri, %5 saf su ve %1 hidrojen peroksit (H_2O_2) ilave ederek biyodizelin yapısal değişikliklerini incelediler. Hidrojen peroksitin bileşenleri, biyodizelin doymamış karbon zincirindeki π bantlarına bağlanma eğilimindedir ve biyodizelin metil esterine elektrofilik ilavesini sağlar. Metil esterin çift zincirleri, hidrojen peroksidin hidroksil grubu ile bağlantılıdır. Sonuçta; biyodizele uygulanan peroksidasyon işleminin ısıl değere bir etkisin olmadığını fakat bu işlemin etkisiyle oluşan daha yüksek oksijen bileşenin daha fazla kimyasal reaksiyona ve bunun sonucu olarak da daha az karbon artığına neden olduğunu tespit etmişlerdi. Peroksidasyon işlemi daha yüksek yanma verimine ve daha düşük siyah duman yayılmasına sebep olduğu için, biyodizel üretiminde peroksidasyon işleminin uygulanmasının yanma karakteristiklerinin gelişmesine ve PM emisyonlarının azalmasını neden olduğu tespit edilmiştir. Biyodizel üretimi esnasındaki reaksiyon sıcaklığı ve reaksiyon zamanı, yağ asitlerinin karbon zincir özelliklerine etki etmektedir. Uzun reaksiyon zamanı ve yüksek reaksiyon sıcaklığında, yağ asitlerinin kararsız çift bantları ile çevre havası arasındaki oksidasyon reaksiyonu hızlanır. Böylece, yağ asidinin çift zincir sayısı azalır ve biyodizel üretimi esnasında ilave peroksidasyon işleminin yapılması, doymuş yağ asitlerinin ağırlık oranlarının artmasına neden olur (Lin *et al.* 2006; Lin and Lin 2008)

2.3.3.e. Yağlayıcılık

Dizel yakıtların kimyasal yapılarında bulunan kükürt bileşenlerinin hem çevreye olumsuz etkileri hem de motor üzerindeki olumsuz etkileri (aşınma, korozyon vs.) nedeniyle düşük kükürt içeren dizel yakıt kullanımı ön plana çıkmıştır. Bu nedenle desülfürizasyon amacıyla rafineri yapılan dizel yakıttan yağlayıcı maddelerde ayırt edilmektedir. Yağlayıcı maddeler özellikle pompa, enjektör gibi yüksek performanslarda çalışan hareketli parçalar da çok önemli olduğu için rafineri yapılan dizel yakıta, yağlayıcı özelliği olan katkı maddelerinin katılması gerekmektedir. Diğer taraftan biyodizelin ihtiva ettiği yağ bileşenleri nedeniyle, sahip olduğu yağlayıcılık özelliği, yağlamayla ilgili parçalarda olumlu sonuçlar doğurmaktadır. Dizel yakıtlara düşük seviyede (%1-2) biyodizel ilave edilmesi, düşük kükürtlü dizel yakıttaki yağlama problemini bertaraf

edecektir. Dizel yakıtta yağlama artırıcı katkı maddelerinin ilave edilmesi ile biyodizel ilave edilmesi durumu karşılaştırıldığında, biyodizelin yakıt özelliğine sahip olması (ısı enerjisinin olması) nedeniyle, biyodizel kullanımı ön plana çıkmaktadır. Ayrıca doymamış yağ asitleri, doymuş yağ asitlerine ve etil esterleri, metil esterlerine göre daha iyi yağlayıcı özelliğine sahiptir (Knothe 2005).

2.3.3.f. Kararlılık

Yakıtın depolanması esnasında hava, ısı, ışık, depolama kaplarının yapısında ki metal, antioksidan ve peroksitlerin bulunması yakıt kararlılığını etkileyen parametrelerdir. Ancak bunlardan hava, ısı ve depolama kabında metal bulunması daha sık karşılaşılan önemli parametrelerdir (Knothe 2005).

Yakıtlardaki kararsızlık, yakıt filtresinin tıkanmasına, enjektörlerde tortu oluşumuna, yakıt sistemindeki parçalarda ve yanma odasında tortu birikimine sebep olduğu için motor performansını kötü bir şekilde etkiler. Yakıttaki kararsızlık, renk değişimi ve çözünmüş haldeki tortuların bulunması ile tespit edilebilir (Jain and Sharma 2010).

Kararlılık Çeşitleri: Yakıtlardaki kararlılığını; oksidasyon kararlılığı, depolama kararlılığı ve ısı (termal) kararlılık olarak üç farklı kısımda incelemek mümkündür. Bunları sırayla inceleyelim.

Oksidasyon kararlılığı: Biyodizel oksitlenmeye duyarlıdır ve hava ile temas ettiği zaman oksitlenir. Biyodizelin oksitlenmesi, doymamış yağ asit zincirlerinin bulunmasından kaynaklanmaktadır. Yapıda, çift zincir bulunması, oksijen ile kimyasal reaksiyonların fazla miktarda olmasına neden olur (Lin and Lin 2008).

Biyodizelin kararlılığı açısından, oksidasyon kararlılığı öncelikle öneme sahiptir. **Oto-oksidasyon**, bazı yağ bileşenlerinin zincirlerindeki çift bağların bulunmasından kaynaklanır. Doymamış yağ bileşenlerinin oto-oksidasyonu, çift bağların pozisyon ve

sayısına bağı olarak farklı oranlarda gelişir. Çift bağların allilik (allylic) pozisyonu oksidasyon için uygundur. Liroleik asit ve linolenik asit gibi poli-doymamış yağ asitlerindeki bis-allilik pozisyonu, allilik pozisyondan daha fazla oto-oksidasyona elverişlidir. Çoğu biyodizel yakıtlarda oksidasyon kararlılığını etkileyen oleik, linoleik, linolenik asit esterinden önemli miktarda bulunur. Oksidasyon esnasındaki şekillenen türler, yakıtın kötüleşmesine (kalitesinin düşmesine) neden olur. Doymamış yağ bileşenleri miktarına bağı olmaksızın güçlü bir şekilde etkiler (Knothe 2005).

Doymamış organik bileşenlerin oksidasyon yatkınlığı, doymuş bileşenlerden daha fazladır. Katı yağlarda daha fazla bulunan poli-doymamış zincirler bileşenler ise mono-doymamış zincirli bileşenlerden iki veya daha fazla kat oksidasyona uygundur (Dunn 2005). Biyodizelin oksidasyon kararlılığını artırmak için peroksidasyon işlemi uygulanır (Lin and Lin 2008).

Biyodizel oksidasyon kararlılığı, Avrupa'da EN 14213 ve EN 14214 standartları kullanılarak tespit edilmiştir. Son yıllarda EN 14214 standarttı kullanımı artmıştır. Standartta Rencimate aparatı (110°C de min. 6 saat) kullanılarak ölçülen kararlılığının OSI (Oil Stability Index) değerine benzediği tespit edilmiştir (Knothe 2005; Jain and Sharma 2010).

TBA (thioborbuturic acid) değeri; yakıt oksidasyon derecesinin önemli bir göstergesidir. TBA değerinin yüksek olması, yüksek miktarda yakıt oksidasyonu olduğunu gösterir. Bu değer, ultraviyole visible spektrometre ile analiz edilir. Yakıt oksidasyonun, depolama zamanı ve reaksiyon sıcaklığından etkilendiği tespit edilmiştir (Lin *et al.* 2006).

Depolama kararlılığı: Bir akışkanın depolama kararlılığı, onun çevresi ile reaksiyonu sonunda fiziksel ve kimyasal özelliklerindeki değişmeye karşı göstermiş olduğu dirençtir. Yakıtın kararlılığı; olefinler, dienler ve nitrojen içeren, sülfür içeren ve oksijen içeren

bileşiklerin reaksiyonuna bağlıdır. Reaksiyon sonucunda oluşan kararsız bileşiklerin miktarı ve tipine bağlı olarak renkte değişiklik ve çökme oluşur (Dunn 2005).

Biyodizel ve karışımlarındaki oksidasyon kararsızlık eğilimi, bitkisel yağlardan ve dizel yakıttan daha fazladır. Bunun sebebi biyodizelin yapısındaki yağ asitlerinin çift zincirlerinin sayısıdır. Teknolojiye bağlı olarak biyodizelin uzun süreli depolamada oksidasyon direncinin artırılması, biyodizel yakıt kalitesinin artırılmasını sağlar (Jain and Sharma 2010).

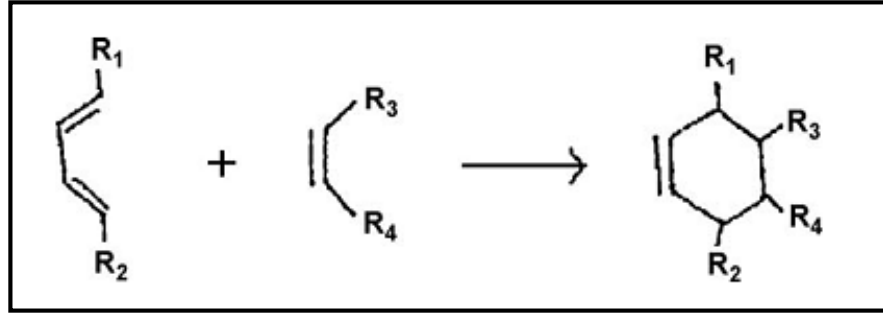
Biyodizelin iki yıl depolanması sonucunda, viskozite, peroksit değeri, asit değeri ve yoğunluk özelliklerinin arttığı, ısıl değerinin azaldığı tespit edilmiştir. Özellikle viskozite ve asit değeri, bir yıllık depolama sonunda belirgin bir şekilde artmaya başlamıştır. 90 günlük depolama testleri sonucunda viskozite, asit değeri, peroksit değeri, serbest yağ asit değeri, anisidine değerinde ve UV emilim değerinde önemli artışlar olduğu gözlemlenmiştir. Farklı kaynaklardan temin edilen biyodizel numuneleri, 20-22 °C’de ışıık ve ısıdan arıtılmış bir ortamda 170-200 gün muhafaza edildiğinde, viskozite ve asit değerinde herhangi bir artış olmadığı görülmüştür (Jain and Sharma 2010).

Yakıtların uzun süreli depolanması sonucunda oluşan bozulmalar, aşağıda tanımlanan nedenlerden dolayı oluşmaktadır (Dunn 2005).

- Çevre havası ile oksidasyon veya oto-oksidasyon oluşumu,,
- Aşırı ısıdan dolayı termal (ısıl) oksidasyon oluşumu,
- Yakıt hattında ve tanktaki nem veya suyun etkisiyle hidroliz oluşumu,
- Yakıt içindeki toz partiküllerinin hareketinden veya suya damlalarındaki mantar ve bakterilerden oluşan mikrobik kirlenme oluşumu,

Termal (ısıl) kararlılık: Yüksek sıcaklıktan dolayı yağ ağırlığında artışa neden olan etki oksidasyon reaksiyonu olarak tanımlanmaktadır. Yüksek sıcaklıkta metilen, poli-doymamış olefin yapıların arasına girerek daha kararlı bileşik yapıdaki izomerizasyonunu başlatır. Önce izomerizasyon başlar, sonra bir yağ asit zincirinden

oluşan birleştirilmiş dien grup, başka bir yağ asit zincirinden bir olefin grup ile (sikloheksan halkası şekline gelmek için) reaksiyona girebilir. Birleştirilmiş di-olefin ve mono-olefin gruplar arasındaki bu reaksiyona Diels Alder Reaksiyonu denir. Bu reaksiyon 250-300°C veya daha yüksek sıcaklıklarda önemli olur. Bu reaksiyon şekli Şekil 2.23.'de gösterilmektedir. (Jain and Sharma 2010).



Şekil 2.23. Diels-Alder reaksiyonu

Termal kararlılık; uzun süreli yakıt kararlılığının elde edilmesi amacıyla, yakıta doğal veya sentetik antioksidanların eklenmesinin etkisi ve doğal oksidasyondaki sıcaklığın etkisini ifade etmek için kullanılır.

Kararlılığa etki eden parametreler; Bir biyodizel yakıtının depolanabilme yeteneğini, iyot değeri, peroksidasyon değeri ve asit sayısı göstermektedir (Lin *et al.* 2006).

İyot sayısı; yakıtın doymamışlık derecesini gösterir. Bu değerin yüksek olması, yakıtta doymamış yağ asitleri miktarının yüksek olduğunu gösterir. Uzun reaksiyon zamanında ve yüksek sıcaklıkta peroksidasyon işlemine tabii tutulan biyodizelde, 18:3 ve 18:2 karbon zincirleri gibi çift zincirlerin sayısı azalır, 18:0 ve 16:0 gibi doymuş yağ asitlerinin ağırlık oranı artar. Bu durum iyot sayısının azalmasına neden olur (Lin *et al.* 2006). İyot değeri, TS EN 14214 standardında en fazla 120 iken, TS EN 14213 standardında en fazla 130 olarak tanımlanmıştır (Öğüt ve Oğuz 2006; Graboski and McCormick 1998).

Asit sayısı; yağdaki serbest yağ asitlerinin miktarını tahmin etmek için kullanılan bir değerdir. Asit sayısının yüksek olması, daha fazla miktarda serbest yağ asidi olduğunu gösterir. Serbest yağ asitleri motorda korozyon etki yapar (Lin *et al.* 2006; Chattopadhyay and Sen 2013).

Peroksit değeri; Oksidasyonu göstermek için pek uygun bir metot değildir. İkincil oksidasyon ürünlerinden dolayı, oksidasyon azalırken, peroksit değeri artar (Jain and Sharma 2010).

Bazı çalışmalarda kararlılık indeksi olarak bilinen oksitlenebilirlik (OX) değerini kullanılmaktadır.

$$OX = [0.02(\%O) + (\%L) + 2(\%Ln)]/100 \quad (24)$$

Burada O; oleik asit(18:1), L; linoleik asit (18:2) ve Ln; linolenik asit (18:3) dir. Bu değer giriş periyodu ile OX arasındaki ilişkiyi (artıp-azaldığını) gösterir ve $R^2=0,2255$ olduğu için kuvvetli bir ilişki tanımlaması yapmak mümkün değildir (Jain and Sharma 2010).

Kararlılık artırma metotları; Oksidasyonu tamamıyla engellemek imkânsızdır fakat antioksidanlar kullanılarak önemli ölçüde azaltmak mümkündür. Antioksidanlar; zincir kırıcılar ve hidroperoksit bozucular olmak üzere iki çeşittir. Hidroperoksit bozucular ile ilgili çok az çalışma vardır. Zincir kırıcı antioksidanlar ise fenolik ve amin olmak üzere iki tiptir. Yağların ve esterlerin kararlılığıyla ilgili yapılan çalışmaların tamamı fenolik antioksidan tipiyle ilgilidir. Bu antioksidan yüksek seviyede kararsız hidrojen içerir. Böylece yağ veya ester hidrojeninden daha kolay elde edilir. Sonuç olarak, antioksidan serbest radikali ya kararlıdır veya bir kararlı molekül (zincir oksidasyon işlemine direnç gösterir) ile reaksiyona girer. Böylece zincir kıran antioksidanlar, kararlılığı artırmak için oksidasyon zincir reaksiyonunun arasına girerler. Antioksidanların etkinliği genellikle, hem antioksidanlı, hem de antioksidansız ester veya yağ moleküllerinin gerilmeleri ile ölçülür. Antioksidanları temin edilme durumlarına göre; doğal antioksidanlar ve suni

antioksidanlar olmak üzere iki farklı kısımda incelemek mümkündür (Jain and Sharma 2010).

2.3.3.g. Malzeme çözücülüğü

Biyodizel orta dereceli bir çözücüdür. Boyanmış yüzeyler ile temas ettiğinde, bazı boyaları çözebilmektedir. Emniyet açısından kazara döküldüğü yerlerden silinmesi gerekir. Önceden dizel yakıt kullanılmış bir motorda biyodizel kullanıldığı zaman, dizel yakıt etkisi ile oluşan tortular biyodizel tarafından çözüleceği için, yakıt filtresi ve enjektörlerde tortu tıkanma olur. Bu durumda biyodizel kullanmadan önce yakıt deposu iyice temizlenmelidir (Öğüt ve Oğuz 2006).

Pirinç, bronz, bakır, kurşun, kalay ve çinko, dizel ve biyodizel yakıtlar ile okside olduğu için tortulaşma oluşur. Bu nedenle bakır borulardan, pirinç regülatörden, bakır rekorlardan, kurşun ve çinko kaplamalardan kaçınılmalıdır. Bu malzemeler uygun özellikteki malzemeler ile değiştirilmedir (Tyson and McCormick 2006). Biyodizel bazı malzemeler (çeşitli metal, kauçuk ve plastik) üzerinde korozyon etkisi yapar. Ayçiçek yağı etil esteri ile ilgili yapılan bir çalışmada; çelik, pik döküm, alüminyum, pirinç, bakır, galvaniz çelik ve paslanmaz çelik gibi metallerdeki korozyona bağlı kütle kaybının 1 mikrometre/yıl olduğu tespit edilmiş, püskürtme pompası ve kontrol bağlantıları üzerinde herhangi bir korozyon etkisi rastlanmamıştır. Diğer taraftan ayçiçek yağı metil esteri ile yapılan başka bir çalışmada ise; metal parçalarda korozyona rastlanmadığı ancak tüm plastik aksamın sertleştiği ve mukavemetinin düştüğü gözlemlenmiştir (Öğüt ve Oğuz 2006).

2.3.3.h. Ayrıştırılabilirlik

Biyodizel, ayrışabilir bir yakıttır. Yapılan bir çalışmada, 28 günde dizel yakıtın %30 ayrışmasına karşın biyodizelin %95-98 oranda ayrıştığı görülmüştür. Bu özelliği

nedeniyle Avrupa ülkelerinde; hassas tarım arazilerinde, deniz kenarlarında, orman arazilerinde kullanımı zorunlu hale getirilmiştir (Öğüt ve Oğuz 2006).

2.3.3.i. Depolanabilirlik

Biyodizel yüksek parlama noktası sıcaklığı nedeniyle depolama ve taşıma emniyeti yüksek olan bir yakıttır. Bu özelliğine istinaden dizel yakıtın taşınması işleminde güvenliği artırmak amacıyla dizel yakıtı bir miktar biyodizel katılabilir. Ancak biyodizel kimyasal çözünürlük özelliği nedeniyle asfaltta yumuşama etkisi oluşturduğu için özellikle tanklara transfer işleminin çok dikkatli yapılması gerekmektedir. Depolama ve taşıma esnasında dikkat edilecek hususlar aşağıda sıralanmıştır (Öğüt ve Oğuz 2006).

- Depolama amaçlı olarak dizel tanklar ve dizel depolar kullanılabilir. Mevcut tankta su varsa uzaklaştırılmalı, bakır-pirinç ve bronz malzemeler çelik veya alüminyum olanlarıyla değiştirilmelidir.
- Biyodizel tanklarının hava ile temas edip, oksitlenmemesi için tam dolu tutulması gerekmektedir.
- Depolama sonrası kullanımlarda pH değeri kontrol edilmeli ve bu değerin 7-10 arasında olmasına özen gösterilmelidir.
- Depolama sonrasında özgül ağırlığının 0,9 u aşım aşmadığı kontrol edilmelidir.
- Depolama işlemi nemli ve ılık havalarda yapılacaksa, depo veya tanklara katkı maddesi ilave edilmesi gerekmektedir.

2.3.4. Motor karakteristik özellikleri

Dizel motorlarda kullanılan biyodizel, %10 oksijen bulunması nedeniyle aynı miktardaki dizel yakıtına oranla daha yüksek yoğunluğa ve daha düşük ısı enerjisi sahiptir. Bu nedenle herhangi bir modifiye yapılmadan biyodizel kullanılan bir dizel motorunda; motor performansları aynı gücün elde edildiği dizel yakıt ile karşılaştırıldığında zaman, yakıt tüketiminin fazla olacağı buna karşın aynı yakıt tüketimi dikkate alınarak yapılan karşılaştırmada ise üretilen gücün azalacağı aşikârdır. Bu nedenle biyodizel kullanılan bir

dizel motorda herhangi bir modifiye yapılmadığı için birim efektif verimde dizel yakıtı oranla büyük bir farklılık bulunmamaktadır.

Literatürde yapılan bazı çalışmalarda; efektif güç, yakıt sarfiyatı, efektif verim gibi motor performans değerlerinde artma, azalma, devir değerine göre artma-azalma, değişmeme şeklinde çeşitli farklılıklar tespit edilmiştir. Bu farklılıkların ne oranda olduğu, aralarında nasıl bir ilişki bulunduğu ise yapılan bazı derleme (review) çalışmalarıyla incelenmiştir. Bu derleme çalışmalarındaki tespit edilen % oranlar(sayılar) Çizelge 2.10'da gösterilmektedir. Bu değerler, oluşan farklılıkların ihmal edilemeyecek kadar önemli olduğunu görülmektedir.

Çizelge 2.10. Motor karakteristiklerinin literatürde dağılım oranları

Yazar/Yıl	Özellik	Artma	Azalma	Aynı	Değişken	Toplam % (Sayı)
Xue <i>et al.</i> 2011	Efektif Güç	7,4 (2)	70,4 (19)	22,2 (6)	-	100 (27)
	Efektif yakıt Tüketimi	87,1 (54)	9,7 (6)	3,2 (2)		100 (62)
	Isıl Verim					
Lapuerta <i>et al.</i> 2008	Efektif Güç	-	96	2	2	100
	Efektif yakıt Tüketimi	98	-	-	2	100
	Isıl Verim	8	4	8	80	100

2.3.5. Egzoz emisyon değerleri

Biyodizel yaklaşık %10 oranında oksijen içeren oksijenleştirilmiş bir yakıt olduğu için yanma esnasında, ortamda dizel yakıtı oranla daha fazla miktarda oksijen bulunur. Ortamda oksijen miktarının fazla olması, yanmanın kalitesini artırır. Yani daha fazla miktarda yakıtın oksijenle birleşmesi sağlanır ve sonuçta daha az miktarda yanmamış yakıt (HC) ile daha fazla miktarda CO₂ oluşur. Yanma esnasında CO₂ miktarının fazla

olması, CO miktarının az olması anlamına gelir. Ayrıca yanma ortamında fazla miktarda bulunan oksijen, yanma esnasında NO_x oluşum miktarını da artırmaktadır. Belirtilen açıklamalar doğrultusunda biyodizelin dizel motorlarda kullanılması sonucunda; CO, HC ve duman miktarını azalırken, CO₂ ve NO_x miktarını artırmaktadır.

Yapılan bazı çalışmalar sonucunda elde edilen verilere göre, bütün emisyon sonuçlarının teorik tanımlamaya uygun olmadığı tespit edilmiştir. Literatürde bu uygunsuzluğun (farklılıkların), oranlarının ve sebeplerinin incelendiği birçok derleme (review) karşımıza çıkmaktadır. Çizelge 2.11’de bazı çalışmalara ait oran dağılımı görülmektedir. Bu çizelge, sonuçlardaki farklılıkların ihmal edilebilecek kadar az olmadığını göstermektedir.

Çizelge 2.11. Emisyon değerlerindeki farklılıkların literatürdeki dağılımı oranları

Yazar/Yıl	Özellik	Artma	Azalma	Aynı	Değişken	Toplam % (Sayı)
Xue <i>et al.</i> 2011	NO _x	65,2 (45)	29 (20)	5,8 (4)	-	100 (69)
	CO	10,6 (7)	84,4 (57)	3 (2)	-	100 (66)
	CO ₂	46,2 (6)	38,5 (5)	15,4 (2)	-	100 (13)
	HC	5,3 (3)	89,5 (51)	5,3 (3)	-	100 (57)
	PM	9,6 (7)	87,7 (64)	2,7 (2)	-	100 (73)
Lapuerta <i>et al.</i> 2008	NOX	85	5	-	10	100
	CO	2	90	1	7	100
	CO ₂					
	HC	1	95	1	3	100
	PM	3	95	-	2	100

2.4. Wavelet Analiz Metodu

2.4.1. Sinyal ve zaman dizileri

Sinyal, fiziksel bir büyüklüğü veya değişkeni temsil eden bir işlev olup bir olgunun doğasına ve davranışına ait bilgiler içerir. Sinyalleri; sürekli-ayrık, analog-sayısal, tek-çift, gerçel-karmaşık, periyodik-periyodik olmayan şekilde gruplandırmak mümkündür (Hsu 1995).

Eğer bir sinyal sonlu ve sonsuz aralıktaki bütün değerleri alabiliyorsa buna sürekli sinyal veya analog sinyal denir. Eğer sinyal değerleri sonlu değer kümesindeki değerleri alabiliyorsa buna da ayrık sinyal ya da sayısal sinyal denir. Bir sinyalin işlenebilmesi için sinyalin, sayısal sinyal olması gerekmektedir. Eğer sinyal sürekli sinyal ise önce örnekleme, sonra nicemleme (sürekli sinyalleri ayrık sinyale dönüştürme işlemi) yapılarak sayısal sinyale dönüştürülmelidir (Oppenheim *et al.* 1997, Proakis ve Manolakis 2010).

Bir fiziksel büyüklüğün bir veya birden çok bağımsız değişkene göre durumunu veren gözlemler topluluğuna zaman dizisi denir. Zaman dizilerinde bağımsız değişken genellikle zamandır. Matematiksel olarak tanımlandığında (t) ye bağlı bir $g(t)$ fonksiyonu şeklinde tanımlanır. Veriler sürekli bir şekilde kaydediliyorsa elde edilen dizilere sürekli diziler, belirli aralıklarda kaydediliyorsa ayrık diziler denir. Sürekli dizilerdeki veri boyutunun fazla olması nedeniyle örneklem yapılarak ayrık diziler oluşturulur. Zaman dizilerini analiz etmenin dört temel amacı vardır.

- Tanımlama: Fiziksel büyüklüğün davranışı (periyodik değişimi, eğimi, eğilimini) tanımlanır,
- Açıklama: Diğer değişkenler ile arasındaki ilişki açıklanır,
- Tahmin: Gelecekte alacağı değer tahmin edilir,
- Kontrol: Beklenti dışında değerlerin alınmasında kontrol edilir.

Bir zaman dizisinden, sinyal çıkarma işlemine Spektral Analiz denir. Şimdi bir sinyalin analizinde kullanılan önemli bazı ifadeleri açıklayalım.

Periyot: Bir olayın, bir dizinin kendini tekrar ettiği zamandır. T ile ifade edilir. Birimi saniyedir. Periyodik olarak tekrarlanan fonksiyonlara periyodik fonksiyonlar denir. $g(t)$ bir zaman dizisi fonksiyonu olsun. (25) numaralı eşitliği sağlayan $g(t)$ zaman dizisine periyodiktir denir ve bu zaman dizisinin periyodu T 'dir.

$$g(t) = g(t + kT) \quad (25)$$

Frekans: Belirli (çoğunlukla standart) bir zaman dilimindeki tam dalga sayısıdır. Birimi Hertz'dir. f ile gösterilir, periyodun ($f = 1/T$) tersidir. Bir tam dalganın bir daireye (2π) karşılık geldiği kabul edilirse, frekans açısal hız olarak da tanımlanabilir.

$$\omega = 2\pi \cdot f \Rightarrow f = \omega/2\pi \quad (26)$$

$$f = 1/T \Rightarrow T = 2\pi/\omega \quad (27)$$

Genlik: Periyodik bir sinyalin tepe noktası ile denge noktası arasındaki mesafedir. Birimi sinyalin çeşidine (volt, pascal, vs.) göre değişir. Sinyalin gücü arttıkça genlik değeri de büyür.

Dalga Boyu: Periyodik bir sinyalin bir tam döngü yaptığında kat ettiği mesafeye denir. Birimi metredir.

2.4.2. Fourier dönüşümü

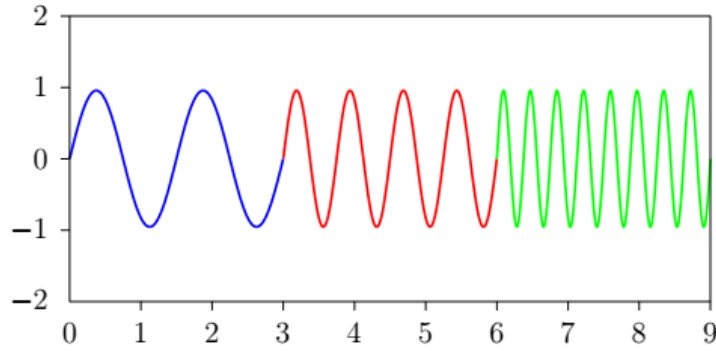
Zaman dizisi değerlerine bakarak bir durumun analizini yapmak çoğu zaman zordur. Çünkü bir olay içerisinde birden fazla periyodik bileşenler mevcuttur. Bu nedenle verilerin zaman alanından frekans alanına taşınması gerekmektedir. Frekans alanı, dizinin içerdiği sinyallerin davranışı ve bu davranışa neden olan fiziksel kuvvetler hakkında bilgi verir. Zaman alanını frekans alanına çevirmek için kullanılan birçok matematiksel metot mevcuttur. Wigner Dağılımı, Fourier Dönüşümü, Hilbert Dönüşümü, Radon Dönüşümü bunlardan bir kaçıdır. Bunlar arasında en çok bilinen ve en yaygın olarak kullanılan Fourier Dönüşümü'dür ve (28) numaralı denklikle tanımlanır (Oppenheim *et al.* 1997; Proakis ve Manolakis 2010)

$$F(g(t)) = \int_{-\infty}^{\infty} g(t) e^{-j\omega t} dt \quad (28)$$

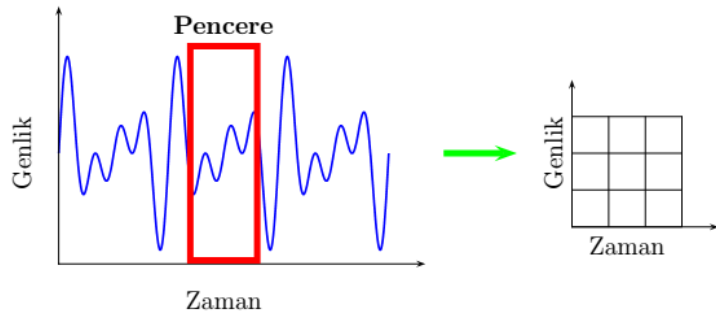
Fourier dönüşümü, bir sinyalin farklı frekanslarını hesaplayarak sinyali zaman tabanından frekans tabanına dönüştürür. Ancak frekans tabanına dönüşen sinyalin zaman bilgisi yok olur. Yani özel bir olayın hangi zamanda olduğu tespit edilemez. Bu dezavantajı sinyalin karakteristik özelliği zamanla değişmiyorsa önemli değildir. Ancak çoğu sinyal önemli değişimlere sahiptir ve bu değişimler kritiktir, çoğu zaman incelenmek istenen noktalardır. Fourier dönüşümünün bu dezavantajını gidermek amacıyla Wavelet Analiz Metodu kullanılmıştır. Bu metot ile sinyaldeki ani değişimlerin (kırılma anı, kenar tespiti, boşluk) zamanı belirlenebilir (Valens 1999).

Frekansı zamanla değişen sinyallere dinamik sinyaller denir ve bir sinyal dinamik sinyal olabilir. Yani sinyal belirli bir zaman aralığında, Şekil 2.24'deki gibi farklı frekanslar içerebilir. Bu durumda frekans değişiminin de tespit edilmesi gerekmektedir. Ancak frekans değişiminin yerinin tanımlanması Fourier dönüşümünde mümkün değildir. Bu durumun bertaraf edilmesi amacıyla yapılan çalışmalar sonucunda, sinyallerin küçük bölümler (pencereler) halinde incelenebileceği tespit edilmiştir. Kısa Zamanlı Fourier Dönüşümü (KSFD) olarak bilinen bu metot ile sinyal belirli aralıklardaki pencelere ile

incelenmektedir. Ancak analiz işlemi pencere boyutuna bağlı kaldığı için sınırlı doğruluğa sahiptir (Şekil 2.25). Pencere boyutu büyükse çözünürlük iyi, küçükse çözünürlük kötüdür (Valens 1999; Sen *et al.* 2008)



Şekil 2.24. Zaman içerisinde frekans değişimi



Şekil 2.25. Kısa zamanlı Fourier Dönüşümü

KSFD, zaman sinyalinin ($g(t)$) yaklaşık bir zaman penceresiyle ($w(t)$) çarpılmasıyla Fourier dönüşüm tekniğinden üretilen bir metottur. Bu metotta sinyal tercih edilen pencere boyutunda adım adım incelenebilir.

Pencerenin yerleştirilmesi, Fourier dönüşümüne zaman boyutunu kazandırır, böylece zaman değişkenli frekans alanı tanımlanmış olur. Ancak seçilen pencere boyutunun şekil ve genişliğinin tüm frekanslar için aynı olması bu metodun dezavantajıdır. Örneğin giriş sinyali periyodikse, sinyal kısa bir pals biçimindeyse veya başlangıç ve bitiş genliği aynı

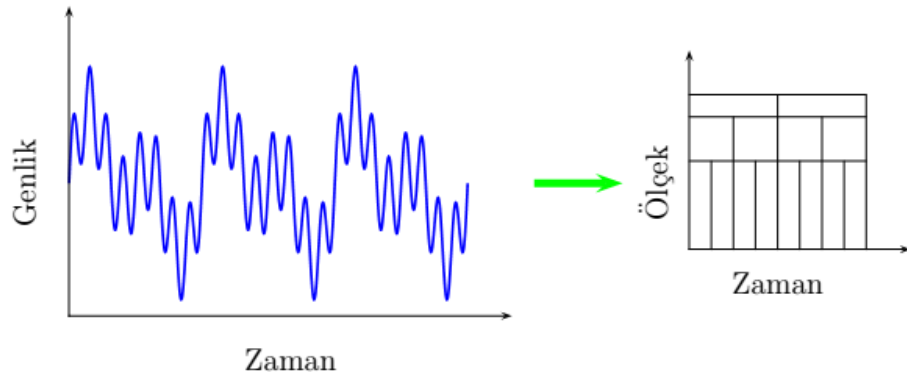
ise dikdörtgen pencere seçilmelidir. Sinyal periyodik değilse üçgen pencere fonksiyonu seçilmelidir. Geniş bir pencere az zaman aralığı belirleyeceğinden dolayı dönüşüm sonucunda zaman çözünürlüğü az olur. Buna karşın frekans çözünürlüğü yüksek olur. Analizde pencere fonksiyonu dar alınır bu seferde, zaman çözünürlüğü iyi, frekans çözünürlüğü kötü olur. Yani hem yüksek frekans için hem de alçak frekans için aynı pencere boyutu kullanılır ve frekans değiştikçe pencere boyutu değişmez. Daha doğru analizlerin yapılması ancak yeniden farklı boyutlu pencereler kullanılarak analizin tekrar yapılmasıyla mümkündür. İlk yapılan pencereleme işleminden sonra birkaç defa daha farklı boyutlarda pencereler kullanılarak analizlerin yeniden yapılması hem zaman kaybına hem de gereksiz işlemlere neden olmaktadır. KZFD yönteminin bu eksikliği nedeniyle frekans alanında farklı pencereleme imkânını sağlayan yeni bir metoda kullanılmaya başlanılmıştır. Bu metod Wavelet analiz metodudur (Torrence and Compo 1998). Fourier dönüşümünde sinyal, sinüs fonksiyonunun farklı frekansları şeklinde ifade edilirken, Wavelet analiz metodunda sinyal ana dalgacığın belirli bir ölçekte ve zamanda bir miktar kaydırılmasıyla elde edilir. Fourier dönüşümünde, pencere fonksiyonu kullanılırken $w(t)$, Wavelet dönüşümünde dalgacık olarak tanımlanan fonksiyon $(\psi(t))$ kullanılmaktadır.

2.4.3. Wavelet analiz metodu

Dalgacık analiz metodu olarak bilinen bu metodun temeli 1805 yılında Joseph Baptiste Fourier tarafından oluşturulmuştur. 1909 yılında Alfred Haar doktora tezinde “Wavelet” ifadesini kullanmış ve bu teori ile ilgi esaslar hakkındaki ayrıntılar, ilk defa Jean Morlet ve Alex Grossmann yönetimindeki Marsilya Teorik Fizik Merkezi çalışma grubu tarafından 1985 yılında ortaya atılmıştır (Abbak 2007).

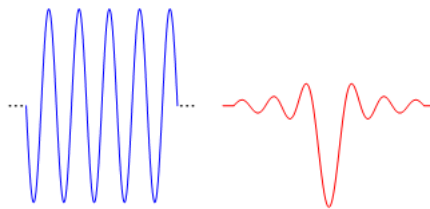
Wavelet analiz metodunu en önemli özelliği sinyali yerel analiz yapabilmesidir. Yani büyük bir sinyali küçük alanda analiz edebilmesidir. Örneğin, bir sinyalde oluşan küçük bir süreksizlik, Fourier dönüşümünde anlam ifade etmezken, Wavelet analiz metodunda bu süreksizliğin kesin yeri ortaya çıkar.

Wavelet analiz metodu, zaman-genlik alanında tanımlanan bir sinyali Fourier Dönüşüm metodundan farklı olarak zaman-ölçek alanına taşımaktadır. Bu alanda sinyal çizgiler ile değil, alanlarla tanımlanır (Şekil 2.26). Bu metotla hem uzun zaman aralığında alçak frekans bilgisi, hem de kısa zaman aralığında yüksek frekans bilgisi tanımlanır (Graps 2006).



Şekil 2.26. Zaman-genlik alanından, zaman-ölçek alanına geçiş

Wavelet analiz metodunun temelini oluşturan dalgacık fonksiyonları, ya ortagonal veya non-ortagonal fonksiyonları tanımlamak için kullanılır. Ancak genelde ortagonal fonksiyonlar için kullanılan bir terimdir. Ortogonal fonksiyonlar, ayrık wavelet analiz metodu kullanılarak, non-ortogonal fonksiyonlar ya ayrık veya sürekli wavelet analiz metodu kullanılarak tanımlanır. Ayrıca bu yöntem ile bir sinyalin sıkıştırma (compression) veya arındırma (de-noising) işlemi sinyalin orijinali bozulmadan yapılabilir (Torrence and Compo 1998).



Şekil 2.27. Sinüs dalgası ve bir dalgacık örneği

Wavelet analizi farklı frekansa sahip, durağan olmayan güçteki zaman serilerinin analizi için kullanılır. Aşağıdaki her iki şartı da sağlayan fonksiyon, dalgacık fonksiyonu ($\psi(t)$) olarak tanımlanır (Sen *et al.* 2008a).

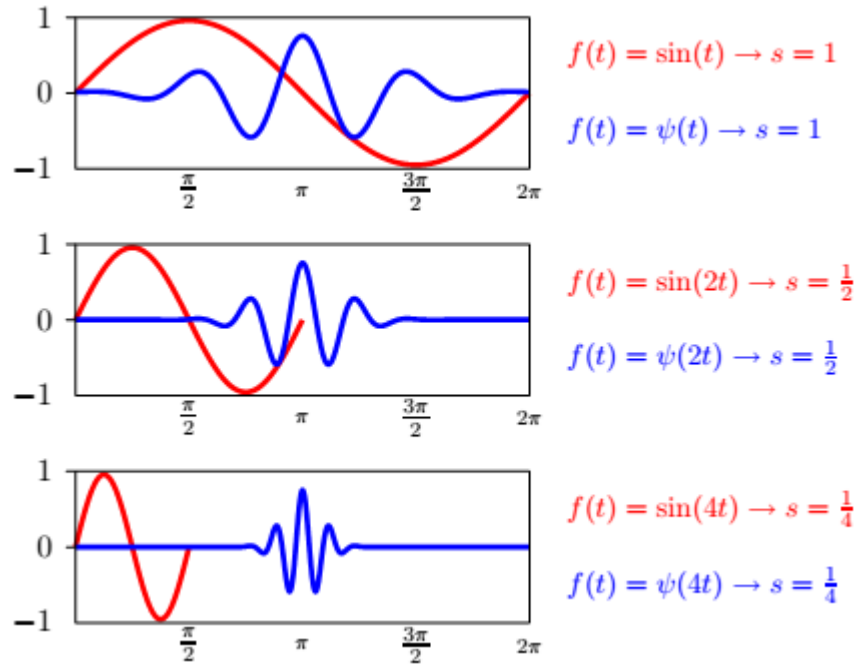
- İntegrali sifıra eşit olmalıdır. ($\int_{-\infty}^{+\infty} \psi(t)dt = 0$)
- Karesinin integrali bire eşit olmalıdır. ($\int_{-\infty}^{+\infty} \psi^2(t)dt = 1$)

Wavelet analiz işleminde kullanılan dalgacıklar, sınırlı zamanda etki eden bir dalga biçimidir. Dalgacık fonksiyonu; bir ana dalgacık (ψ) fonksiyonundan, kaydırma parametresi (τ) ve ölçekleme parametresi (s) değiştirilerek elde edilen fonksiyonlardır. Analiz yapılacak dizinin karakteristik özelliğine göre değişen, birbirinden farklı 15 adet dalgacık fonksiyonu mevcuttur. Haar, Meksika Şapkası, Meyer, Gaussian, Morlet en çok kullanılanlarıdır. Her bir fonksiyonun özelliği farklıdır. Örneğin; Meksika Şapka fonksiyonu gerçek değerlidir ve dalga gücünde ayrı pik olarak zaman serisinin hem pozitif hem negatif salınımlarını yakalar. Morlet dalga fonksiyonu hem komplekstir hem de Meksika Şapkasından daha fazla salınım içerir. Böylece tek bir geniş pencerede hem negatif hem pozitif pikleri birleştirir (Torrence and Compo 1998). Dalgacık analizi, bir sinyale zaman ve ölçek perspektifinden bakmayı amaçlar. Ölçek yerel düzenlilik hakkında fikir verirken, zaman dalgacığının oluşum anını ifade eder. Ölçekleme işlemi fonksiyonun yatay eksen boyunca belli oranlarda sünmesi veya büzülmesidir. Ölçek faktörü s ile gösterilir, bu değer küçüldükçe dalgacık aynı oranda sıkıştırılır. f frekans olmak üzere $s = 1/f$ şeklinde hesaplanır. τ ; pencerenin geçici pozisyonunu ifade eder. Bu pencere sinyal üzerinde kaydırıldığında frekans spektrumunun geçici bilgisi elde edilmiş olur (Arı vd. 2008). Ölçek, frekansın tersi olduğu için bazı uygulamalarda zaman-frekans veya zaman-periyot gösterimi kullanılır. Periyodik ve quasiperiyot bileşenli zaman dizileri için Morlet Dalgacığı ana dalgacık olarak kullanılmaktadır. Morlet dalgacığı Gaussian fonksiyonlu bir düzlem dalgacık modeli içerir. Ve aşağıdaki gibi tanımlanır.

$$\psi(\eta) = \pi^{-1/4} e^{i\omega_0\eta} e^{-\eta^2/2} \quad (30)$$

Burada $\omega_0 = 2\pi f_0$ olup, diğer dalgacıkların referans alındığı dalgacığın merkezidir. ω_0 'ın değeri dalgacığın salınım sayısını kontrol eder ve böylece uygun wavelet analiziyle zaman sonuçlarını ve frekansını gösterir. Daha büyük ω_0 değeri yüksek frekans çözünürlüğünü sağlarken, daha küçük ω_0 değeri, daha uzun zaman çözünürlüğü sağlar (Sen *et al.* 2010).

Dalgacık fonksiyonunu seçilmeden önce, Wavelet analiz metodunda kullanmak için gerekli s ölçeğini seçmek gerekir. Küçük ölçek detayları gösterirken, büyük ölçek daha büyük resim demektir (Şekil 2.28). Bir ortagonal dalgacık, ölçeklerin ayrı ayarlarıyla sınırlıdır iken non-ortagonal dalgacık resmi daha fazla tamamlamak için rastgele ölçek ayarı seçilebilir (Torrence and Compo 1998).



Şekil 2.28. Sinüsoid ve dalgacıkta ölçek faktörü

Dalgacık analizi için önemli olan dalgacık fonksiyonunu ($\psi_0 n$) doğru seçmektir. Bu nedenle dalgacık seçiminde aşağıdaki faktörler dikkate alınmalıdır.

- **Ortagonal-nonortagonal:** Ortagonal fonksiyonlarda, her ölçekteki konvulasyon sayısı o ölçekteki temel dalga genişliğine oranıdır. Böylece dalga gücünün ayrı bloklarını içeren bir dalga spektrumu üretir.
- **Kompleks-gerçek:** Bir kompleks dalgacık fonksiyonu hem faz hem genlik bilgisini verir.
- **Genişlik:** Dalga fonksiyon genişliği, dalga genlik zamanının kırılması olarak tanımlandı. Dalga fonksiyonunun kararlılığı, Fourier alanındaki genişlik ile gerçek genişlik arasındaki denge olarak tanımlandı. Zamandaki dar fonksiyon iyi kararlılığa fakir frekans çözünürlüğüne sahip iken, fakir zaman çözünürlüğüne sahip geniş fonksiyon iyi frekans çözünürlüğüne sahiptir.
- **Şekil:** Dalga fonksiyonu zaman serisinde sunulan özellikleri göstermelidir. Keskin adımlara sahip bir zaman serisi, Haar gibi bir fonksiyon ile daha yumuşak adımları olan bir fonksiyon için sönümlü kosinüs gibi yumuşak fonksiyon seçilmelidir (Torrence and Compo 1998).

Wavelet analiz metodu, Sürekli Wavelet Analiz Metodu ve Ayrık Wavelet analiz metodu olarak ikiye ayrılır (Valens 1999).

2.4.3.a. Sürekli Wavelet analiz metodu (SWA)

Bu metot, dalgacık fonksiyonunun kaydırılıp bir ölçek ile çarpılmasından sonra, zaman alanı boyunca toplanmasıyla elde edilir ve aşağıdaki gibi hesaplanır (Arı vd 2008).

$$SWA_{(s,\tau)} = \int_{-\infty}^{+\infty} g(t) \cdot \psi_{s,\tau}^*(t) dt \quad (31)$$

$g(t)$: dönüşümü yapılacak fonksiyon

$\psi_{s,\tau}(t)$: Dalgacık yada ana dalgacık fonksiyonu

τ : Kaydırma Parametresi

($\tau > 0$: zaman ekseninde sağa doğru kayma, $\tau < 0$: sola doğru kayma)

- s : Ölçek Parametresi
 ($s > 1$: zaman ekseninde fonksiyon genişler ve genliği düşer)
 ($s < 1$: zaman ekseninde fonksiyon daralır ve genlik büyür)
 ($s < 0$: $t=0$ noktasına göre simetri alınır)
 $*$: Kompleks eşleniği temsil eder.

Dalgacık fonksiyonları, bir ana dalgacık fonksiyonundan ölçek ve kaydırma faktörlerinin kullanılmasıyla elde edilir, matematiksel olarak;

$$\psi_{s,\tau}(t) = \frac{1}{\sqrt{s}} \psi\left(\frac{t-\tau}{s}\right) \quad (32)$$

şeklinde tanımlanır. Burada $1/\sqrt{s}$ faktörü, farklı ölçeklere sahip normalizasyon faktörü olarak açıklanır. Bu eşitlik (32) eşitliğinde yerine konursa; (Arı, Özen ve H.Çolak 2008)

$$SWA_{(s,\tau)} = \frac{1}{\sqrt{s}} \int_{-\infty}^{+\infty} g(t) \cdot \psi_{s,\tau}^*\left(\frac{t-\tau}{s}\right) dt \quad (33)$$

2.4.3.b. Ayırık Wavelet analiz metodu (AWA)

Elde edilen tüm zaman dizilerinin veri sayısı arttığı zaman, analizin süresi ve hassasiyeti artar. Bunu engellemek için belirli ölçekte gruplar oluşturularak analiz yapılır. Genel olarak (en pratik ve en kullanışlı olan) s ve τ değerlerini ikinin kuvveti olacak şekilde tanımlamaktır. Bu şekilde yapılan dalgacık tanımlanması Ayırık Dalgacık Dönüşü (ADD) olarak adlandırılır. Matematiksel olarak sürekli dalgacık dönüşümünden hiçbir farkı yoktur. Sadece hesap sınırı, dizinin zaman aralığına, ölçek-kaydırma değerleri de analistin tercihine bağlıdır. Bir zaman dizisinin ADD değeri aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır (Arı vd. 2008).

$$AWA_{\tau,s} = \psi(2^s n + \tau) \quad (34)$$

Wavelet güç spektrumu (WPS); belirli bir ölçek ve bölgedeki sinyal enerjisinin miktarı olarak tanımlanır ve SDD değerinin karesi $[(SDD_{(s,\tau)})^2]$ ile ifade edilir. Hem ölçeğe, hem zamana bağlı olan WPS değeri, bir yüzey tarafından gösterilir. Bu yüzeyin konturlarının alınarak bir düzleme çizilmesi, zaman-ölçek gösterimli dalgacık güç spektrumunu oluşturur (Sen *et al.* 2008a)

WPS değeri, değişimin baskın modlarını tanımlamaktadır. Bu değer her ölçek için hesaplanmalıdır. Genellikle skolagram olarak ifade edilir ve farklı ölçek veya frekanslardaki değişimin dalgalanmasını iyi bir şekilde ifade tanımlar (Sen *et al.* 2008a).

Global Wavelet spektrumu (GWS); zaman dizilerinin spektral özellikleri hakkındaki ilave bilgi, global dalgacık spektrum ile açıklanabilir. GWS tüm motor çevrimleri üzerindeki her bir ölçekteki WPS'nin ortalaması hesaplanarak elde edilmektedir. GWS aşağıdaki gibi hesaplanır (Sen *et al.* 2008a).

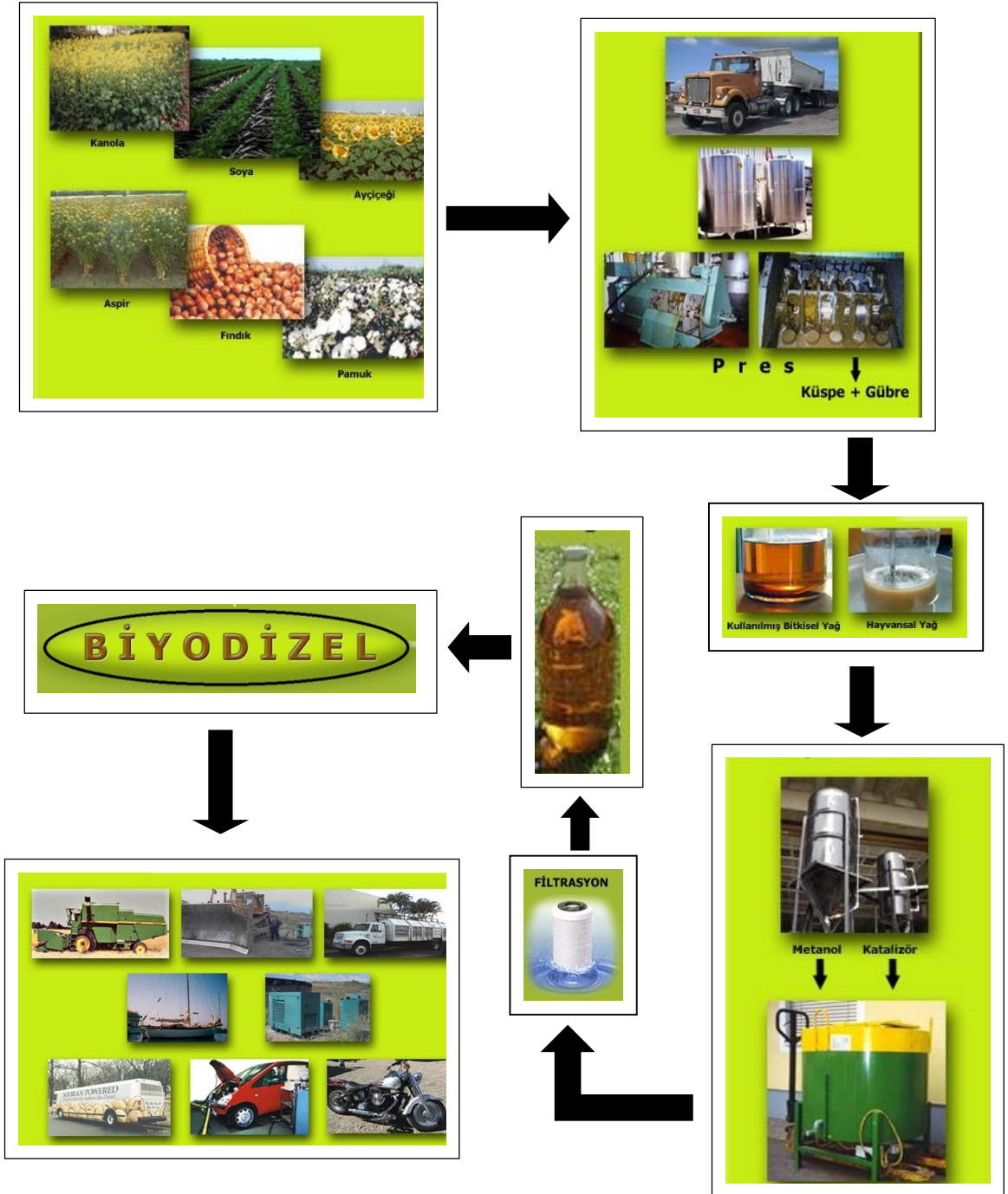
$$\overline{W}_S^2 = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N |W_n(s)|^2 \quad (35)$$

GWS, frekansın veya periyodun bir fonksiyonu olarak gücü gösterir ve zaman dizilerinin hassas Fourier spektrumuna bir örnektir. Değişimin baskın modlarının periyotları, GWS'nin değişken piklerinden tahmin edilmektedir (Sen *et al.* 2008a).

Koni Etkisi ; sonlu uzunluktaki zaman dizilerinde, ayrık Fourier Dönüşümü kullanılarak SWA'nın hesaplanması için zaman dizilerinin periyodik olması gerekmektedir. Bu nedenle genellikle zaman dizileri sıfıra taşınır. Sıfıra taşıma ise dalga güç spektrumlarının sonunda hatalara neden olur. Kenar etkisinin önemli olduğu bu bölge koni etkisi olarak tanımlanır. Koni etkisi dışında tanımlanan değerler güvensiz olabilir ve dikkatli bir şekilde yorumlanmalıdır.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Biyodizel Üretim Prosesi



Şekil 3.1. Biyodizel üretim prosesi

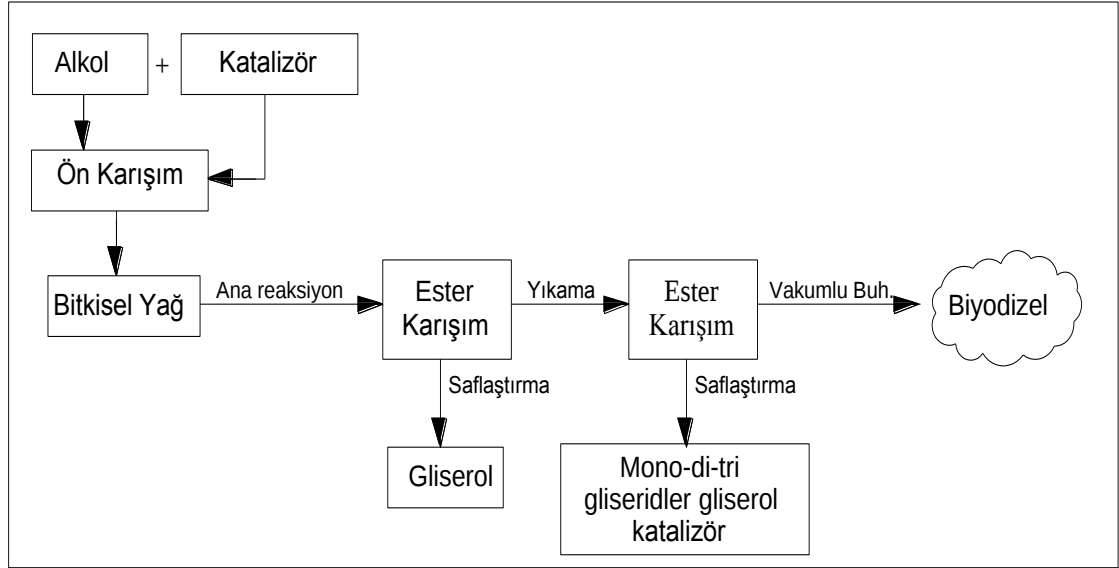
Bir dizel motorda kullanılan biyodizel yakıtına ait motor performansı, egzoz emisyonları ve çevrimsel farkların analiz edildiği bu çalışmanın en genel haliyle, tarladan tekere biyodizelin aşamaları Şekil 3.1’de özetlenmektedir.

Deneysel çalışmamızda yakıt olarak kullanılacak olan biyodizel numuneleri labortuvarda üretilerek elde edilmiştir. Biyodizel üretimi için Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Kimya Mühendisliği Bölümü Laboratuvarı kullanılmıştır. Üretim işlemi ve bazı ön deneyler bu laboratuvarda yapılmıştır.

Çalışmada; beş farklı çeşit biyodizel numunesi (B100) ve bu numunelerin dizel yakıt ile farklı oranlarda karıştırılmasıyla elde edilen karışımlar (B20, B50) kullanılmıştır. Beş farklı çeşit biyodizel üretimi için beş farklı çeşit bitkisel yağ kullanılmıştır. Bunlar; kanola, mısır, soya, Ayçiçek ve fındıktır. Bu bitkisel yağların temini marketlerden satın alınarak yapılmıştır. Kanola yağı Yudum marka, soya yağı Emek marka, ayçiçek yağı Sırma marka ve mısır-fındık yağları da Oruçoğlu marka olarak temin edilmiştir.

Biyodizel üretiminde transesterifikasyon metodu kullanılmış ve alkol olarak metil alkol, katalizör olarak potasyum hidroksit tercih edilmiştir. Bu prosesin gerçekleşme şeması Şekil 3.2’de ve laboratuvardaki deney düzeneği ile bu düzenekte kullanılan ekipmanlar Şekil 3.3’de gösterilmektedir.

Transesterifikasyon reaksiyonu en genel haliyle üç farklı aşamada (ön karışım, ana reaksiyon ve ayırıştırma) incelemek mümkündür.



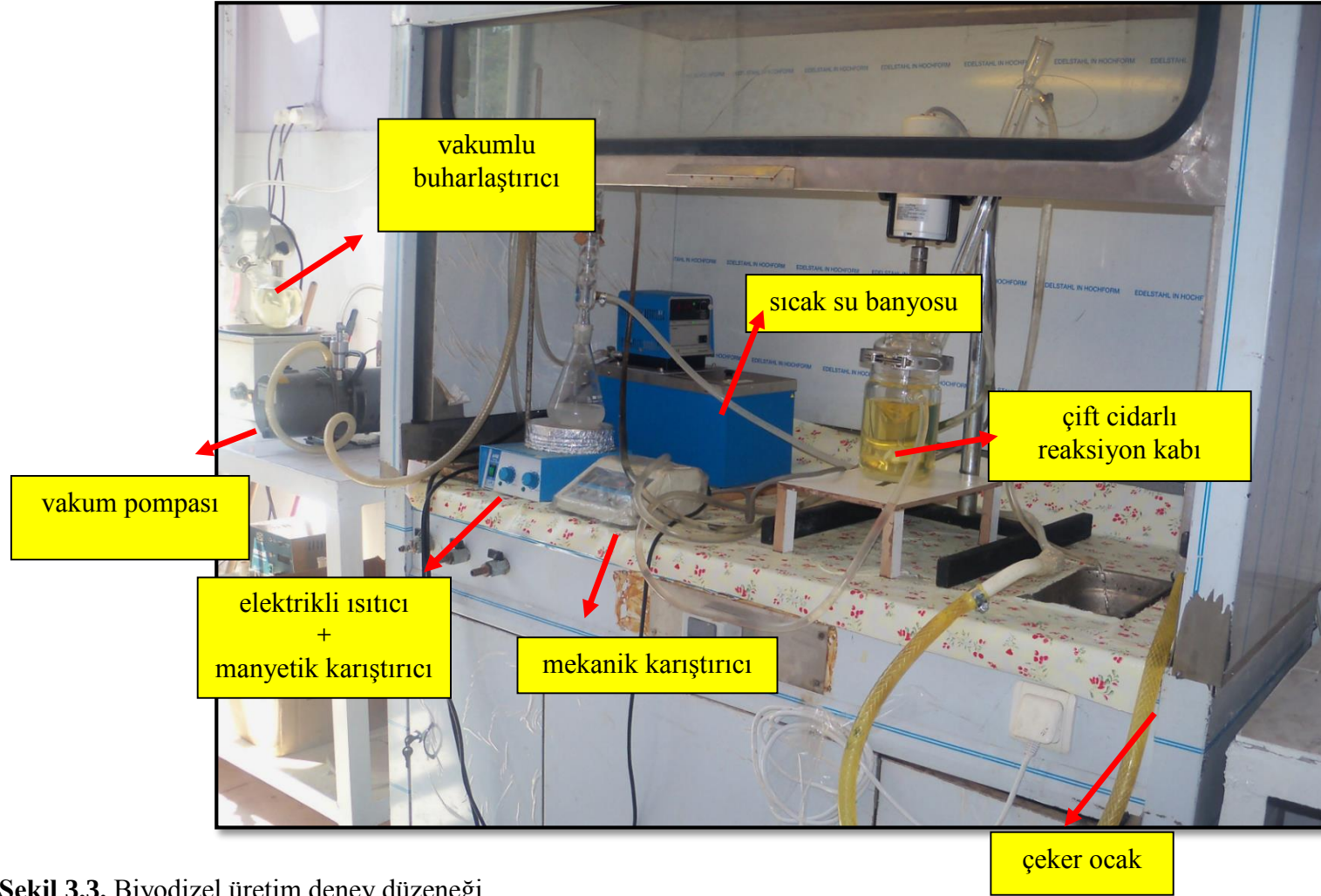
Şekil 3.2. Transesterifikasyon reaksiyon şeması

• **Ön karışım (alkol ve katalizör karışımının hazırlanması):** Alkol olarak metil alkol (CH_3OH) ve katalizör olarak potasyum hidroksit (KOH) kullanılmıştır. Reaksiyonda kullanılacak bitkisel yağ miktarı dikkate alınarak hazırlanan alkol+katalizör karışımında; alkol miktarı bitkisel yağın hacimsel olarak %20 si ve katalizör miktarı bitkisel yağın kütsel olarak %1 i olarak kullanılmıştır. Bir cam kap içine alınan alkol üzerine katalizör ilave edilmesi ve katalizörün alkol içerisinde tamamen çözülmesinin sağlamak amacıyla manyetik karıştırıcı da 30 dakika karıştırılmasıyla elde edilen karışım Şekil 3.4’de görülmektedir.

• **Ana reaksiyon (bitkisel yağa alkol ve katalizör karışımının ilave edilmesi):** Bu işlem transesterifikasyon reaksiyonun en önemli kısmıdır. Bu işlemin sıcaklığı ve işlem süresi, reaksiyonun kalitesi (dönüşüm oranı) açısından çok önemlidir. Bu kısımda reaksiyon sıcaklığı, metil alkolün buharlaşmasını engellemek amacıyla metil alkol kaynama noktası sıcaklığının (63°C) altında ki bir sıcaklıkta (56°C) gerçekleşmiştir. Sıcak su banyosuna bağlı olan çift cidarlı cam kaba konulan bitkisel yağın, kararlı hale gelmesi için hızı 60 dev/dak olan mekanik karıştırıcı ile 20 dakika karıştırılır (Şekil 3.5(a)). Bu sürede sonunda, ön karışım elde edilen alkol+katalizör homojen karışımı, bitkisel yağın üzerine ilave edilerek ana reaksiyon başlatılır. Reaksiyonun

gerçekleşmesi için hızı 450 dev/dak olan mekanik karıştırıcı ile 60 dakika karıştırılarak reaksiyonun tamamlanması sağlanır (Şekil 3.5(b)). Reaksiyon sonunda çift cidarlı kap içerisinde biyodizel, gliserinden oluşan bir karışım elde edilmiş olur. Şekil 3.5’de bu proses görülmektedir.

- **Biyodizelin saflaştırılması:** Ana reaksiyon sonrası çift cidarlı kapta kalan karışım (Şekil 3.5(b)), saf biyodizel değildir. Dönüşümün yaklaşık %90 civarında olduğu düşünülürse ürünler içerisinde bir miktarda girenler bulunacaktır. Bu nedenle saf biyodizelin elde edilmesi için karışımdan sırasıyla gliserol, reaksiyona girmeyen tri-di-monogliseridler, katalizör ve metil alkollün uzaklaştırılması gerekmektedir. Gliserolün yoğunluğu biyodizelden çok yüksektir ve iki maddenin yoğunluk farkından faydalanılarak gliserol ayrıştırılır. Bu amaçla çift cidarlı kaptaki karışım 1 lt kapasiteli ayırma hunisine alınır (Şekil 3.6(a)) ve gliserolün dibe çökmesi için hiçbir işlem yapmadan beklenir. Beş saat bekleme sonunda yoğunluk farkı nedeniyle dibe çöken gliserol ayrıştırılır (Şekil 3.6(b)). Bu ayırma işleminden sonra tekrar beş saat beklenerek geride kalan gliserol de biyodizelden uzaklaştırılır (Şekil 3.6(c)). Ayırma hususunda kalan karışımın içerisinde oluşan yağ asitleriyle birlikte bir miktar tri-di-monogliserid, katalizör, metil alkol ve eser miktarda gliserol bulunmaktadır. Bu nedenle ayırma hunisindeki karışım bulanık bir görüntüye sahiptir. Geride kalan diğer maddeleri (metil alkol hariç) ayırmak için %10 oranındaki saf su kullanılarak üç defa yıkama yapılır. Her yıkama işlemi sonrasında 5 saat beklenilir, dibe çöken kirlilik ve su ayırma hunisinden alındıktan sonra, sonraki yıkama işlemi gerçekleştirilir. Yıkamalar Şekil 3.7(a-b-c)’de görülmektedir. Üç yıkama sonunda kalan biyodizel içerisinde bir miktar saf su ve bir miktarda metil alkol bulunmaktadır. Son olarak metil alkol ve saf suyun ayrıştırılması işlemi de buharlaştırılarak yapılır. Bu amaçla vakumlu buharlaştırıcı kullanılır. Ayırma hunisinden vakumlu buharlaştırma haznesine alınan biyodizel, saflaştırılmak amacıyla 70°C sıcaklık ve 450 Psi vakum basıncında 120 dakika buharlaştırma işlemine tabii tutulur. Vakumlu buharlaştırma sistemine ait resim Şekil 3.8’de gösterilmektedir.



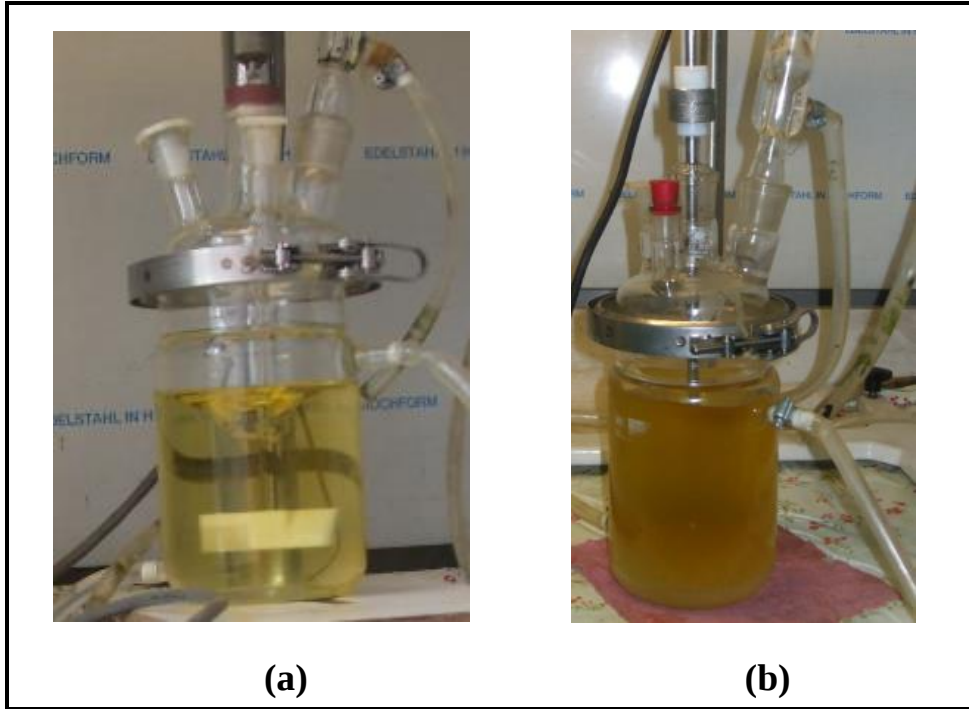
Şekil 3.3. Biyodizel üretim deney düzeneği

metil alkol ve
potasyum hidroksit
karışımı



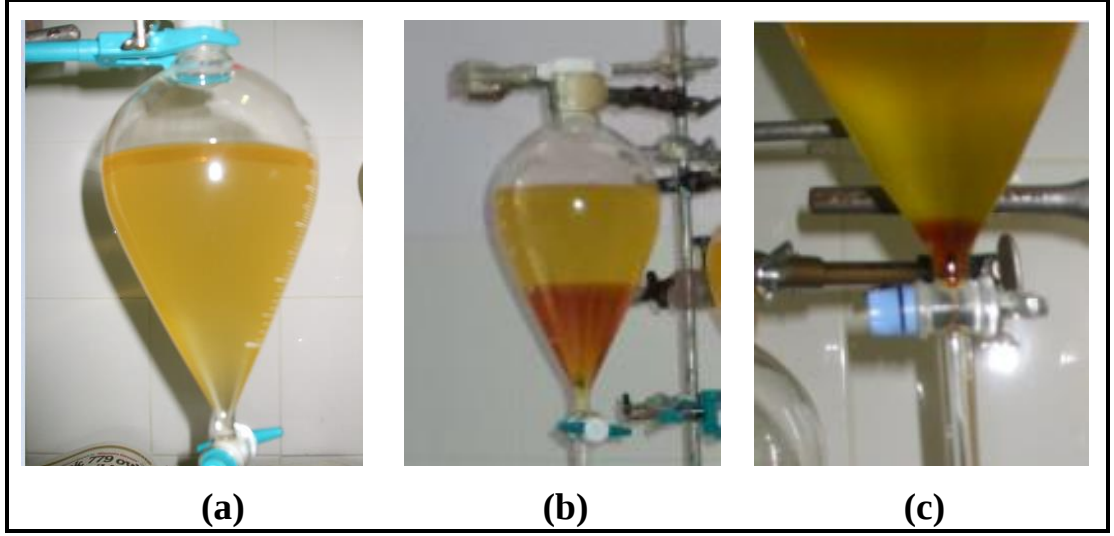
Manyetik karıştırıcı

Şekil 3.4. Metil alkol ve potasyum hidroksit karışımının hazırlanması



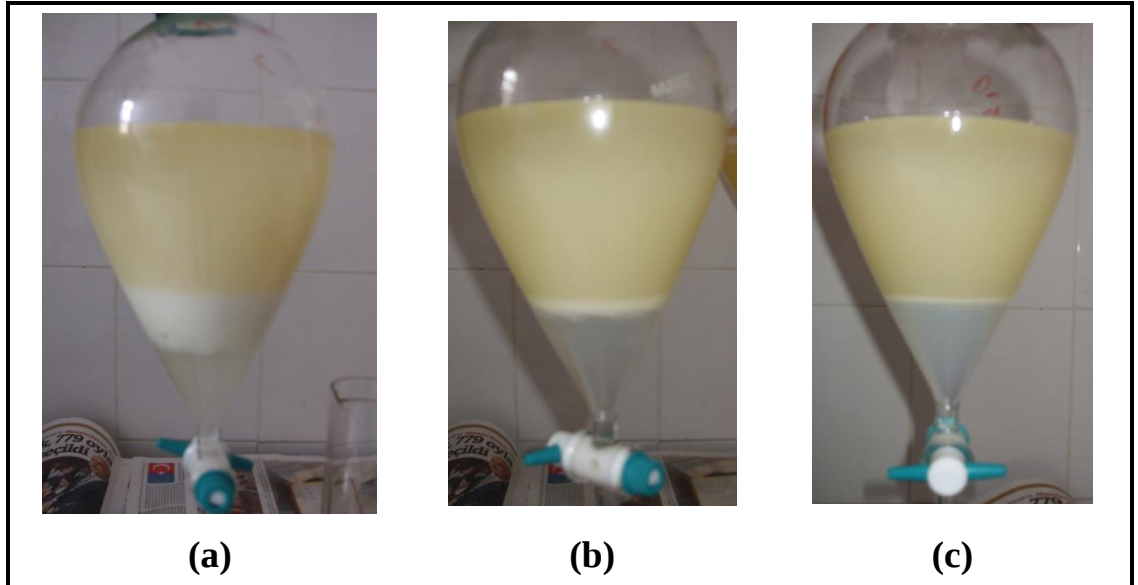
Şekil 3.5. Ana reaksiyonun hazırlanması

* (a) bitkisel yağın ön ısıtılması (b) ana reaksiyonun son hali



Şekil 3.6. Ayırma hunisinde gliserinin ayrıştırılması

* (a) karışımın ayırma hunisine ilk alınma hali (b) karışımın ilk beş saat beklemeden sonraki hali (c) karışımın ikinci beş saat beklemeden sonraki hali



Şekil 3.7. Ayırma hunisinde saf su ile yıkama

* (a) Birinci yıkama (b) İkinci yıkama (c) Üçüncü yıkama



Şekil 3.8. Vakumlu buharlaştırıcı

Biyodizel üretim hattında bulunan cihaz, ekipmanlara ait teknik bilgiler Şekil 3.9’da sunulmuştur.

Cihaz İsmi	Cihaz Resmi	Teknik Detay
Manyetik Karıştırıcı		Kullanım amacı: Manyetik etki oluşturarak karıştırma işlemini yapar. Marka: ARE VELP Kapasite: 10 kademe karıştırma, 350 °C ısıtma

Şekil 3.9. (devam)

Cihaz İsmi	Cihaz Resmi	Teknik Detay
Mekanik karıştırıcı başlığı		Kullanım amacı: Çift cidarlı kap içine yerleştirilen karışımın mekanik olarak karıştırılmasını sağlar. Marka: Servodyne Kapasite: 60-2300 rpm, 3.2 kg-cm tork
Mekanik karıştırıcı kumanda paneli		
Çift cidarlı kap		Kullanım amacı: Cidarında dolaşan akışkanın etkisiyle içine konulan maddelerin istenilen sıcaklıkta muhafaza edilmesini sağlar.

Şekil 3.9. (devam)

Cihaz İsmi	Cihaz Resmi	Teknik Detay
Vakumlu buharlaştırıcı		Kullanım amacı: Bir karışımda bulunan iki maddenin, kaynama noktası sıcak farkından faydalanılarak birbirinden ayrılmasını sağlayan sistemdir. Düşük kaynama noktasındaki bileşenlerin vakum etkisiyle buharlaştırılarak, farklı bir bölgede toplanır. Isıtma (kazan), döndürme etkisiyle karıştırma (evaparatör) ve vakum etkisi oluşturma (pompa) işlemlerinin aynı anda yapıldığı komplike bir sistemdir.
Vakum pompası		
Sıcak su banyosu		Kullanım Amacı: Belirli sıcaklıktaki suyun kapalı bir sistemde sirküle edilmesini sağlar. Birbirine monteli iki farklı parçadan oluşur. Üstteki parça sistemin kontrolünü (sıcaklık pompa hızı vs.) alttaki parça ise içindeki rezistans aracılığıyla ısıtılan suyun pompalanmasını sağlar. Pompalanan sıcak su çift cidarlı kabın etrafında dolaştıktan sonra tekrar aynı yere geri döner.

Şekil 3.9. Biyodizel üretiminde kullanılan cihaz detayları

3.2. Biyodizel Testleri

Üretilen biyodizelin, dizel motorlarda, dizel yakıtı alternatif bir yakıt olarak kullanılabilmesi için yanma ve yakıt özelliklerinin bilinmesi gerekir. Bu nedenle yanma kalitesini direk olarak etkileyen (ısıl değer, viskozite, yoğunluk vs.) fiziko-kimyasal özelliklerinin tespit edilmesi gerekmektedir. Bu özelliklerin tespiti için Üniversitemizde uygun nitelikte/kalitede/hassasiyette cihaz bulunmadığı için bazı deneylerin yapımında yardım alınmıştır. Bu nedenle bazı deneyler Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Kimya Mühendisliği Bölümünde, bazı deneyler Malaya Üniversitesi Makine Mühendisliği Laboratuvarında (Kuala Lumpur/Malezya), yağ asit analizi TÜBİTAK MAM firması tarafından ve elementel analiz değerleri ise yine üniversitemiz Kimya Bölümü Laboratuvarında yapılmıştır. Analizler sonucunda elde edilen bitkisel yağlara ait fiziko-kimyasal özellikler Çizelge 3.1’de, biyodizel numunelerine ait fiziko-kimyasal özellikler Çizelge 3.2’de, yağ asit analiz sonuçları Çizelge 3.3’de ve elementel analiz sonuçları Çizelge 3.4’de sunulmuştur.

Çizelge 3.1. Bitkisel yağların özellikleri

* Malaya Üniversitesinde yapılmıştır.

Sıra Nu.	Özellik	Birimi	Bitkisel Yağ Çeşidi				
			Ayçiçek	Soya	Kanola	Fındık	Mısır
1	Isıl Değer*	kJ/kg	39583	39530,5	39649,5	39666,5	39558,5
2	Dinamik Viskozite (40°C)*	mpa.s	28,954	28,9	31,605	33,94	29,975
3	Kinematik viskozite (40°C)*	mm ² /s	31,945	31,886	34,97	37,695	33,09
4	Kinematik viskozite (100°C)*	°C	7,6063	7,6041	8,0284	8,188	7,7601
5	Bulutlanma Noktası Sıcaklığı *	°C	-10	-8	-14	-18	-9
6	Akma Noktası Sıcaklığı*	°C	-15	-9	-15	-19	-11
7	Soğuk Filtre Tıkanma Noktası Sıcaklığı*	°C	11	11	13	13	12
8	Parlama Noktası Sıcaklığı	°C	238	264	274	236	254
9	Yoğunluk (15°C)*	g/cm ³	0,9239	0,9237	0,9211	0,9184	0,9230

Çizelge 3.2. Biyodizel numunelerinin özellikleri

* Malaya Üniversitesinde yapılmıştır.

Sıra Nu.	Özellik	Birimi	Biyodizel Çeşidi				
			Ayçiçek	Soya	Kanola	Fındık	Mısır
1	Isıl Değer*	kJ/kg	39913,5	39823,5	39986,5	40009,5	39977
2	Dinamik Viskozite (40°C)*	mpa.s	3,6596	3,6869	3,8372	3,9136	3,7289
3	Kinematik viskozite (40°C)*	mm ² /s	4,2162	4,249	4,4339	4,5407	4,2987
4	Kinematik viskozite (100°C)*	°C	1,6502	1,702	1,7524	1,7503	1,7215
5	Bulutlanma Noktası Sıcaklığı*	°C	1	0	-3	8	-4
6	Akma Noktası Sıcaklığı*	°C	-3	-1	-7	-9	-1
7	Soğuk Filtre Tıkanma Noktası Sıcaklığı*	°C	-2	-5	-9	-11	-4
8	Parlama Noktası Sıcaklığı	°C	162	160	166	168	170
9	Yoğunluk (15°C)	g/cm ³	0,8862	0,8864	0,8833	0,8800	0,8852
10	Setan Sayısı	-	46,80	46,66	48,33	52,21	47,33

Çizelge 3.3. Biyodizel yağ asit oranları

Kodu	Yağ Asit Çeşidi	Yağ Asit Oranları				
		Ayçiçek	Fındık	Kanola	Mısır	Soya
7,95	Dodecane		0,1			0,1
10,98	Tridecane		0,2			0,1
13,8	Tetradecane		0,2			0,1
16,44	Pentadecane		0,2			0,1
18,87	Hexadecane		0,2			0,1
21,18	Heptadecane		0,2			0,1
23,4	Octadecane		0,2			
25,5	Nonadecane		0,1			
27,55	Myristic acid, methyl ester	0,1	0,1	0,1		0,1
31,47	Palmitic acid, methyl ester	7,6	6,1	6,1	12,0	12,6
31,91	Palmitoleic acid, methyl ester	0,1	0,1	0,2	0,1	0,1
33,31	Margaric acid, methyl ester				0,1	0,1
35,12	Stearic acid, methyl ester	4,7	2,3	1,9	2,1	3,8
35,48	Oleic acid, methyl ester	29,2	73,4	55,2	31,7	26,3
35,54	Elaidic acid, methyl ester	0,7	0,9	2,6	0,5	1,1
36,19	Linoleic acid, methyl ester	55,2	15,4	26,8	51,6	49,4
36,39	Linoelaidic acid, methyl ester	0,5	0,1	0,1	0,4	0,6
37,23	Linolenic acid, methyl ester	0,1	0,1	5,1	0,7	4,6
38,45	Eicosanoic acid, methyl ester	0,3	0,1	0,4	0,4	0,3
38,75	11-Eicosenoic acid, methyl ester	0,2	0,1	0,9	0,2	0,1
41,59	Behenic acid, methyl ester	0,9		0,2	0,1	0,3
44,53	Lignoceric acid, methyl ester	0,3		0,1	0,1	0,1

Çizelge 3.4. Biyodizel elementel analiz sonuçları

Biyodizel Çeşidi	Element Oranları (%)				
	C	H	S	O	Diğer
Ayçiçek	75,3	11,5	0	12,8	0,4
Kanola	75,7	11,7	0	12,4	0,2
Fındık	75,7	12,2	0	11,9	0,2
Mısır	75,2	11,6	0	13	0,2
Soya	74,0	11,3	0	14,3	0,4

Biyodizel numunelerinin testlerinde kullanılan cihazlara ait teknik bilgiler ve detayları Şekil 3.10’da sunulmuştur.

Cihaz İsmi	Cihaz Resmi	Teknik Detay
Parlama noktası sıcaklığı		Kullanım amacı: Yakıtın alevle teması esnasında parlama sıcaklığını tespit etmek amacıyla kullanılır. Marka: KOEHLER- Pensky-Martens Kapalı tip Parlama Noktası Sıcaklık Tayini * Ölçüm işlemi TS EN ISO 2719 standartlarına uygun olarak yapılmıştır.
Soğuk filtre tıkanma noktası sıcaklığı		Kullanım amacı: Yakıtın soğuk havalardaki davranışını analiz etmek için incelenir. Marka: Cold filter plugging point - automatic NTL450 (Normalab, France) Sıcaklık aralığı: -80/+20 °C (+/- 0.1 °C) Kapasite: 11 Lt

Şekil 3.10. (devam)

Cihaz İsmi	Cihaz Resmi	Teknik Detay
Isıl enerji		Kullanım amacı: Yakıtın ısıl kapasitesini tespiti için kullanılır. Marka: IKA, C200-Kalorimetre Kapasite: 100 - 240 V AC, 50/60 Hz., 14 sn de ölçüm kapasitesi
Viskozite ve yoğunluk		Kullanım amacı: Yoğunluk, yakıtın yanma odasındaki hacmi, yakıt tüketim miktarı ve ısıl verim tespiti için önemlidir. Viskozite yakıt atomizasyonu için önemlidir. Marka: SVM 3000 Stabinger Viscometer (Anton Paar, UK) Kapasite: 1000 mPa.s (80°C), bir saatte 30 numune, otomatik numune değişimi, max 75 W güç tüketimi,
Akma-bulutlanma noktası sıcaklığı		Kullanım amacı: Yakıtın soğuk havalardaki davranışını analiz etmek için incelenir. Marka: Cloud and Pour point tester - automatic NTE 450 (Normalab, France) Sıcaklık aralığı: -80/+20 °C (+/- 0.1 °C) Kapasite: 11 Lt

Şekil 3.10. Biyodizel testlerinde kullanılan cihaz detayları

3.3. Motor Testleri

Çalışmanın bu kısmı; ilk bölümde üretimi detaylı olarak anlatılan biyodizel numunelerinin üniversitemiz Makine Mühendisliği Bölümü Enerji Laboratuvarında mevcut bulunan bir dizel motorunda kullanılması ve kullanım sonucunda elde edilen değerlerin analiz edilmesini içerir. Laboratuvarımızda mevcut bulunan ve deneylerde kullanılan iki silindirli, dört zamanlı SuperStar marka motora ait teknik özellikler Çizelge 3.5’de gösterilmektedir.

Motor deneylerinde; beş farklı biyodizel numunesi (B100) ve bu numunelerin dizel yakıt ile farklı oranlarda karıştırılmasıyla elde edilen B20, B50 yakıtlarının, mevcut dizel motorda kullanılması sonucundaki motor performans ve emisyon değerleri ve yanma esnasında oluşan çevrimsel basınç farklılıkları analiz edilmiş, sonuçlar dizel yakıt değerleriyle karşılaştırılmıştır. Deneylerde kullanılan dizel yakıt Euro Dizel olarak tercih edilmiş ve Petrol Ofisi firmasından satın alınmıştır. Ancak biyodizel yakıtlarının (B100, B50, B20), fiziko-kimyasal özelliklerinin tespit edildiği test cihazlardaki; kalibrasyon, iklim, basınç vs. değişimlerdeki farklılıkları bertaraf etmek amacıyla, karşılaştırmalarda kullanmak amacıyla Euro Dizelin kullanılan fiziko-kimyasal özellikleri aynı cihazlarla yeniden yapılmış ayrıca Petrol Ofisi firması’ndan temin edilen analiz değerleri de **EK-1**’de sunulmuştur. Tespit edilen Euro Dizel yakıtına ait fiziko-kimyasal özellikler Çizelge 3.6’da gösterilmektedir.

Deneylerde kullanılan dizel motora ait ön kesit resmi ve parçaları Şekil 3.11(a)’da, yan kesit resmi ve parçaları Şekil 3.11(b)’de gösterilmektedir. Deney düzeneği yerleşim şeması Şekil 3.12’de ve mevcut sisteme ait hâlihazırdaki laboratuvar resmi Şekil 3.13’de gösterilmektedir.

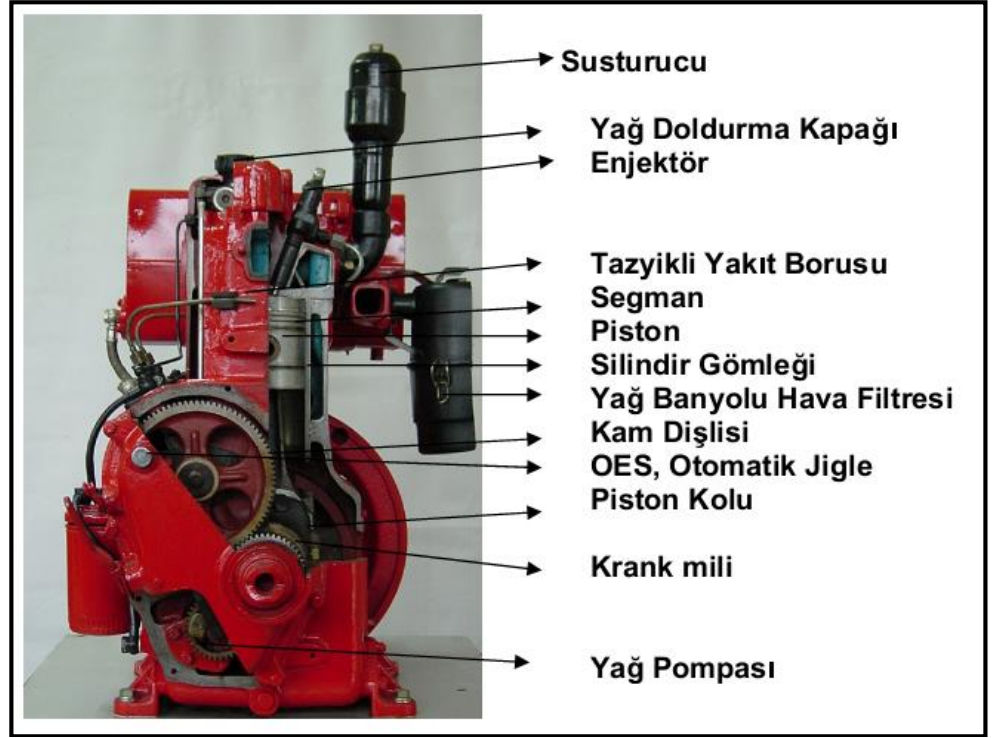
Çizelge 3.5. Deney düzeneğinde kullanılan dizel motora ait teknik özellikler

Sıra Nu.	Teknik Özellikler	
1	Marka/Model	SuperStar/7728
2	Silindir Çapı (mm)	98
3	Silindir Adedi	2
4	Silindir Hacmi (lt)	1.54
5	Strok (mm)	100
6	Yakıt Deposu Kapasitesi Mtp. (lt)	16
7	Yağ Kapasitesi (Filtre Dahil) (lt)	4.3
8	Beygir Gücü (HP)	28
9	Devir Sayısı (dev/dak)	2750
10	Çalışma Prensibi	4 zamanlı, direk enjeksiyonlu, tam dizel motor
11	Sıkıştırma Oranı	1/17
12	Yakıt Sarfıyatı (gr/HP.h)	187
13	Yağlama	Tam Basıncılı (dişili yağ pompası ile)
14	Yağ Basıncı Minimum (atm)	0.6
15	Soğutma	Tropik radyatör ile su soğutmalı
16	Su kapasitesi radyatör ile (lt)	5.25
17	Su Kapasitesi radyatör kabinli tip (lt)	6.75
18	Yakıt Pompası	Superstar Monosilindir
19	Enjektör Kütüğü	Bosch/Delphi
20	Enjetör Memesi	Bosch/Delphi
21	Püskürtme Basıncı (kg/cm ²)	175
22	Subap Boşluğu	Motor Soğuk iken 0.25 mm
23	Püskürtme Başlangıcı	28°-35° ÜÖN dan önce
24	Emme Subabı açılması	15° ÜÖN dan önce
25	Egzoz Subabı kapanması	15° ÜÖN dan sonra

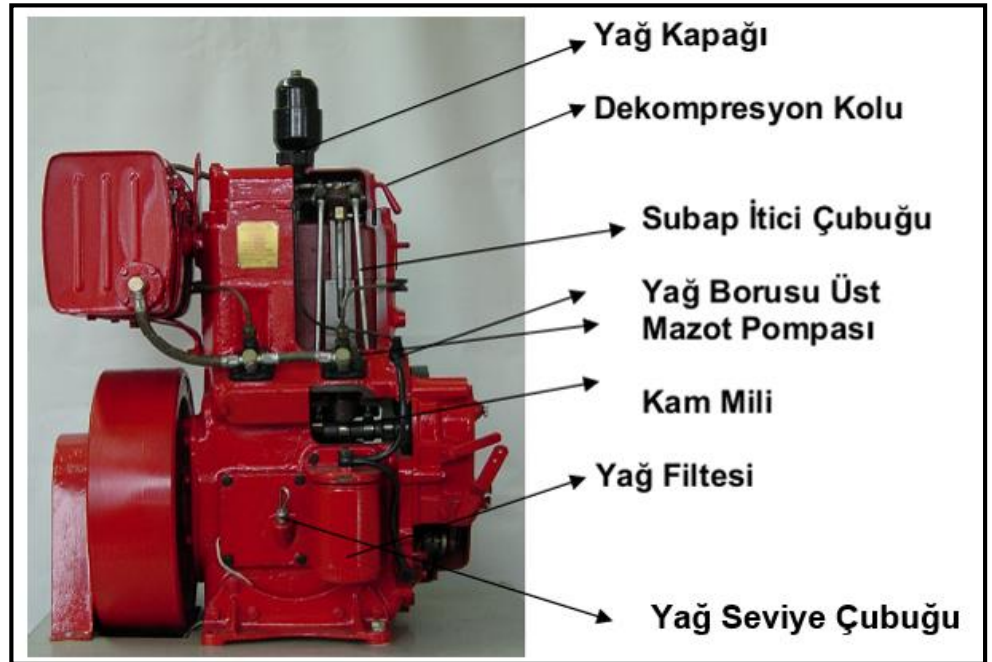
Çizelge 3.6. Euro-Dizel fiziko-kimyasal özellikleri (tespit edilen)

Sıra Nu.	Özellik	Birimi	Euro Dizel
1	Isıl Değer	kJ/kg	45951
2	Dinamik Viskozite (40 °C)	mpa.s	2,4257
3	Kinematik viskozite (40 °C)	mm ² /s	2,9542
4	Bulutlanma Noktası Sıcaklığı	°C	-3
5	Akma Noktası Sıcaklığı	°C	-10
6	Soğuk Filtre Tıkanma Noktası Sıcaklığı	°C	-6
7	Parlama Noktası Sıcaklığı	°C	56
8	Yoğunluk (40 °C)	g/cm ³	0,8211

(a)

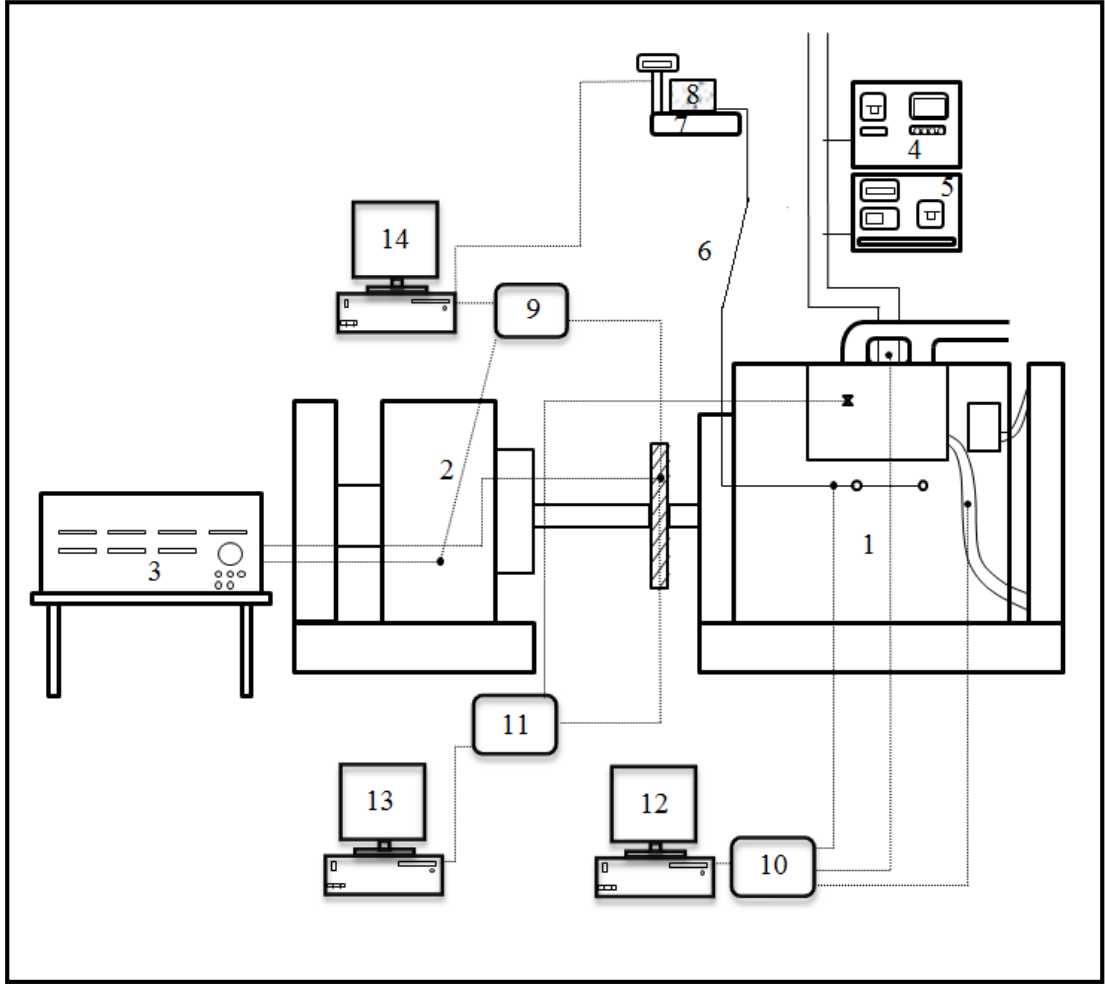


(b)



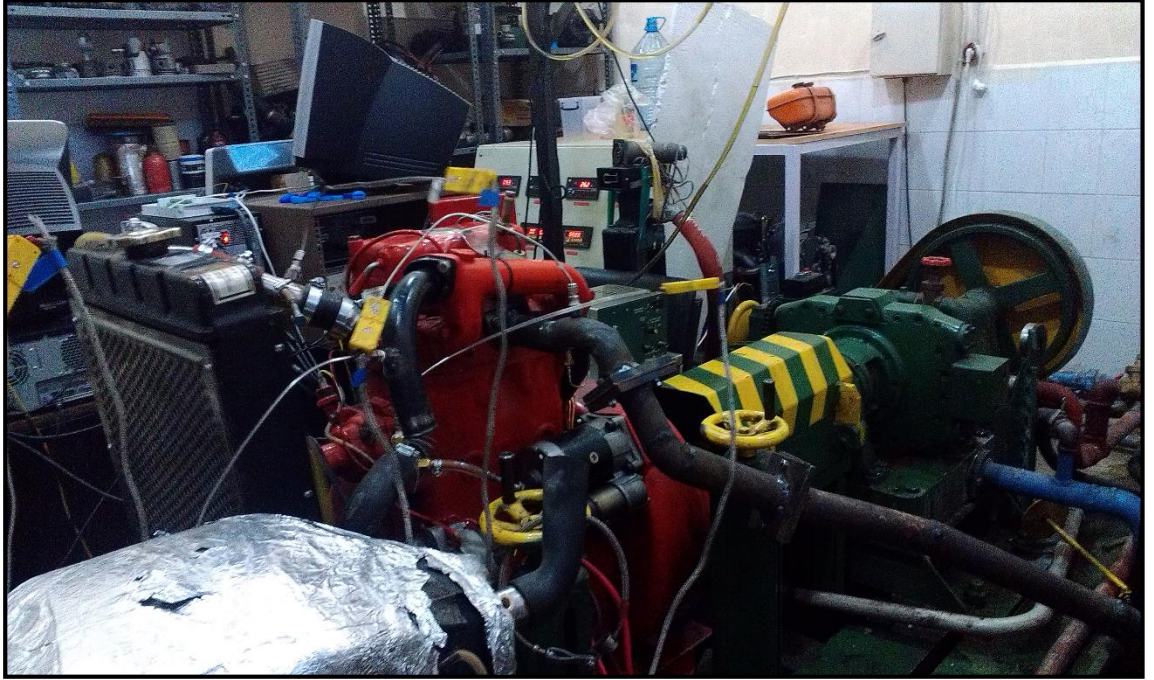
Şekil 3.11. Deney düzeneği resmi

* (a) Ön kesit resmi ve parçaları (b) Yan kesit resmi ve parçaları



Şekil 3.12. Deney düzeneği yerleşim planı

- | | | | |
|---|----------------------|----|----------------------|
| 1 | Motor | 8 | Yakıt Deposu |
| 2 | Hidrolik fren | 9 | Krank Poz. Sensörü |
| 3 | Kontrol ünitesi | 10 | Sıcaklık Sensörü |
| 4 | Egzoz Emisyon Cihazı | 11 | Basınç Sensörü |
| 5 | İslilik Ölçüm Cihazı | 12 | Kişisel Bilgisayar-I |
| 6 | Yakıt Hattı | 13 | Kişisel Bilgisayar-I |
| 7 | Terazi | 14 | Kişisel Bilgisayar-I |

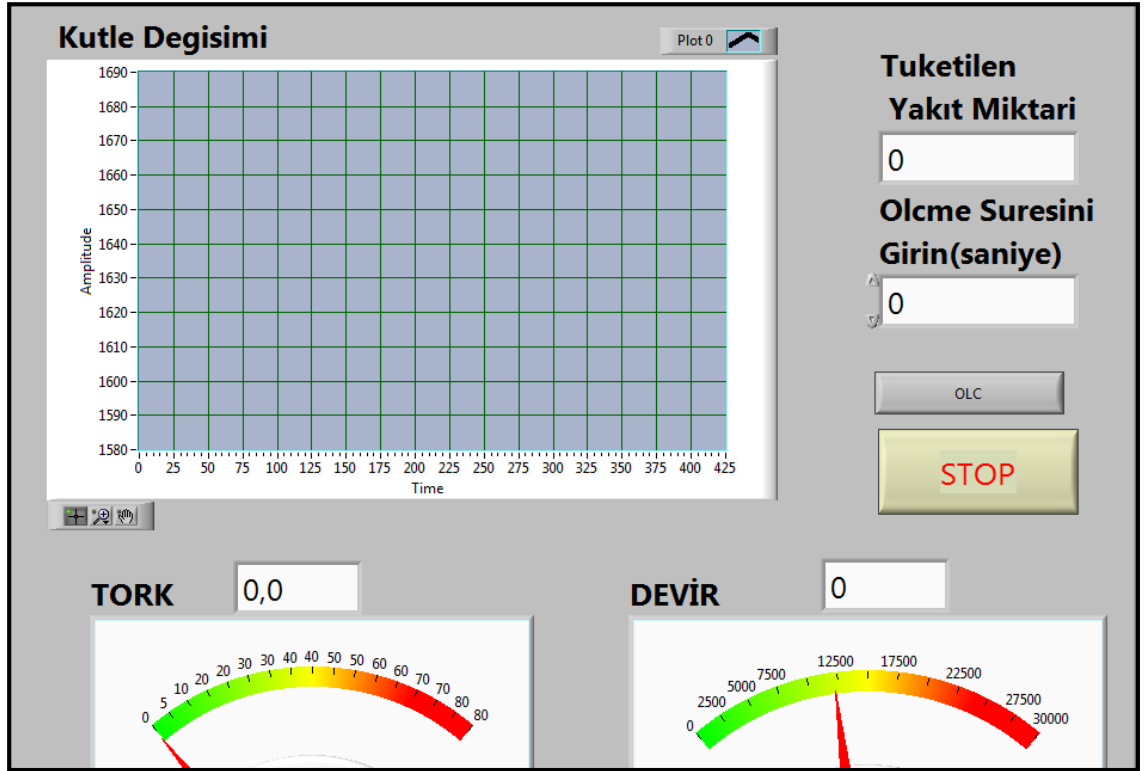


Şekil 3.13. Deney düzeneğine ait resim

28 beygir gücünde, 1/17 sıkıştırma oranında, iki silindirli, dört zamanlı SüperStar marka dizel motor kullanılarak yapılan deneylerde, deney düzeneğinin ön hazırlığı ve deneyin yapılması esnasındaki takip edilen aşamalar aşağıda sunulmuştur.

Deney düzeneğinin ön hazırlık aşamaları;

1. Laboratuvarımızda hali hazırda mevcut bulunan dizel motoru, motor test ünitesine yerleştirilerek volan-şaft bağlantısı, egzoz çıkışı ve dinamometre kalibrasyon ayarı yapılmıştır.
2. Dinamometredeki tork ve devir değerleri LABVIEW programı ile bilgisayara aktarılmıştır. LABVIEW programı ara yüzü Şekil 3.14’de görülmektedir.
3. Yakıt tüketimini ölçmek amacıyla elektrikli dijital terazi kullanılmıştır. Terazinin ölçüm/gösterge sensör verileri LABVIEW programı ile bilgisayara aktarılmıştır. LABVIEW programı ara yüzü Şekil 3.14’de görülmektedir.

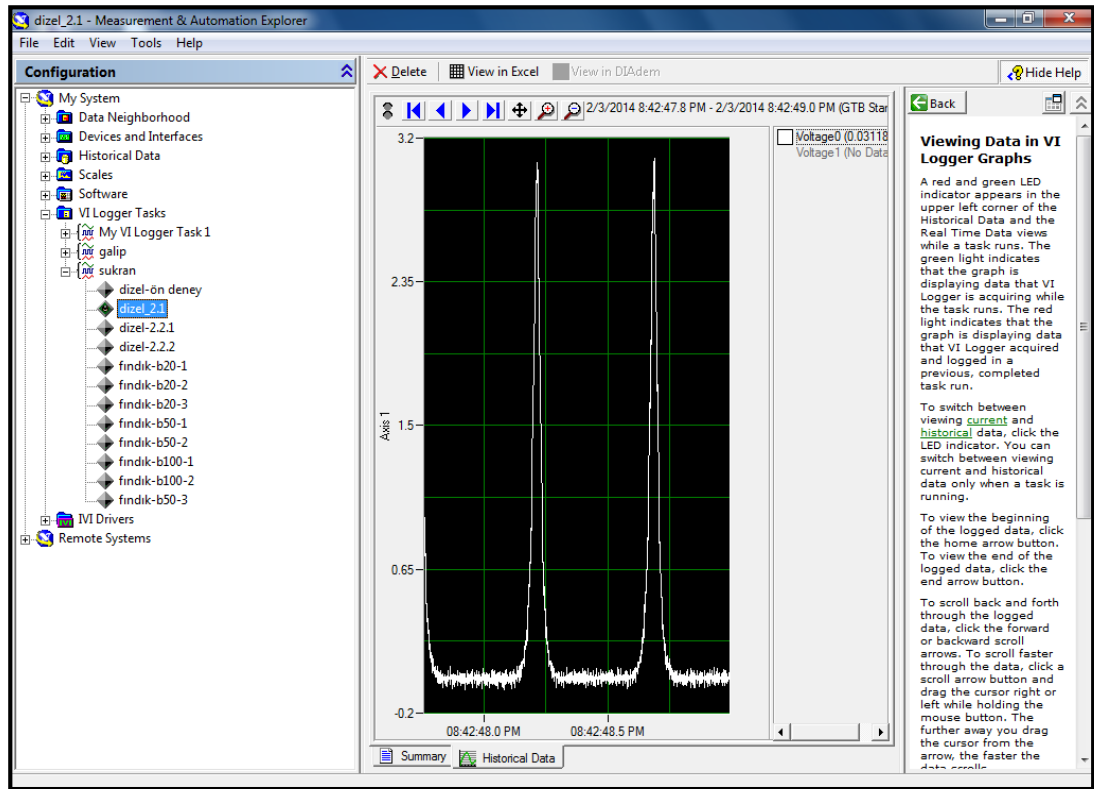


Şekil 3.14. LABVIEW program ara yüzü

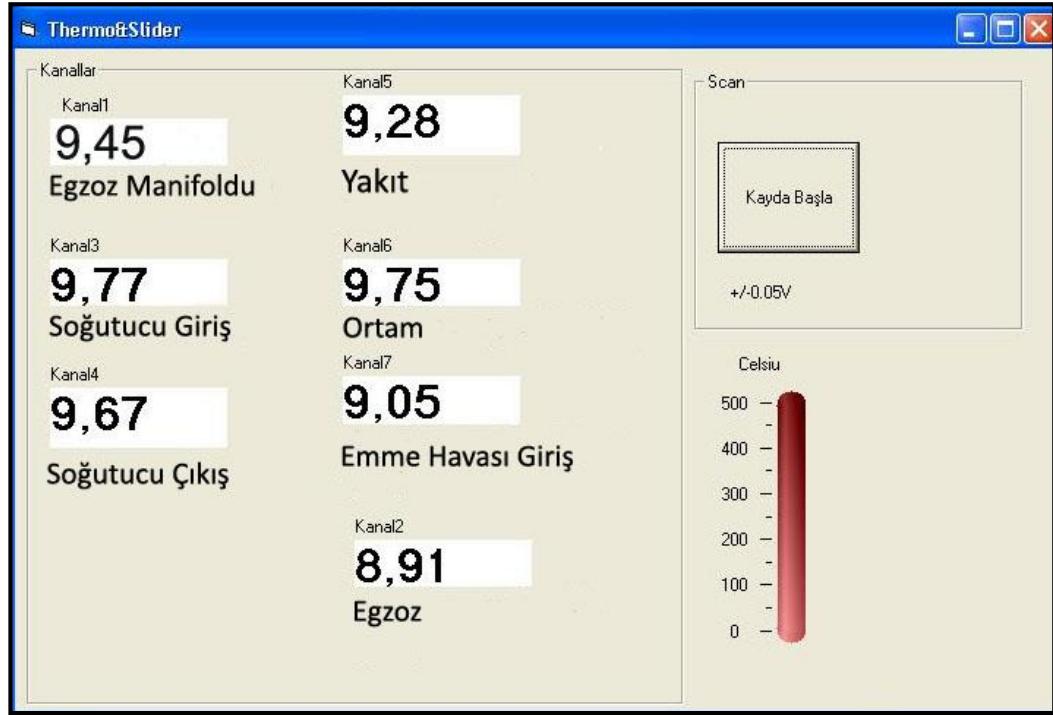
4. İki silindirli motorumuzun silindirlerinden bir tanesinin yanma odasına yerleştirilen basınç sensörü verileri KISTLER 6117BFD17 tip kuartz basınç transdüzeri ile ölçülmüştür. Basınç transdüzerinin özellikleri Çizelge 3.7’de gösterilmektedir. Krank açısı ölçümleri optik şaft okuyucu yardımıyla tespit edilmiştir. Optik şaft okuyucu motor önüne uygun bir şekilde yerleştirildi. Basınç verileri ile krank açısı verileri, National Instruments firmasına ait M serisi 6250 model, 1.25 MS/s DAQ data kartı yardımıyla birleştirildi ve bilgisayara aktarıldı. Bu veriler bilgisayara National Instruments firmasından temin edilen NI-DAQmx yazılım programı yardımıyla işlenmektedir. Programın ara yüzü Şekil 3.15’de görülmektedir.

Çizelge 3.7. Basınç transdüzer özellikleri

Model	KISTLER 6117BFD17
Ölçüm aralığı (bar)	0-200
Hassasiyet (pC/bar)	~16,2
Doğrusallık	$< \pm 0,6$

**Şekil 3.15.** Basınç program ölçüm ara yüzü

5. Motor sıcaklıklarını (soğutma suyu giriş-çıkış sıcaklığı, egzoz sıcaklığı, yakıt sıcaklığı, emme havası giriş sıcaklık) kontrol etmek için termokupl kullanılmıştır. Termokupllar sıcaklık değerlerini ölçmek için uygun noktalara bağlanmış ve elde edilen sıcaklık değerleri data kartı aracılığıyla bilgisayara aktarılmıştır. Programa ait ekran ara yüzü Şekil 3.16’de görülmektedir.



Şekil 3.16. Sıcaklık ölçüm program ara yüzü

6. Emisyon ölçümleri BOSCH marka BEA-270 model egzoz emisyon ölçüm cihazı kullanılarak yapılmıştır. Egzoz çıkışına yakın bir noktaya montajı yapılan cihaz verileri, 5 sn'lik periyotlarla kayıt yapan iki farklı kamera yardımıyla bilgisayara gönderilmiştir. Bu görüntüler Şekil 3.17(a-b)'de görülmektedir.



(a)



(b)

Şekil 3.17. Kamera görüntüleri

* (a) duman ölçüm cihazı (b) egzoz emisyon ölçüm cihazı

Deneyin yapılması;

1. Motorun kararlı hale gelmesi (motor soğutma suyu çıkış sıcaklığı 33°C) için bütün deneylerden önce motor 20 dakika süreyle rölanti devrinde dizel yakıt ile çalıştırılmıştır. Üretilen biyodizel numunelerinin sınırlı miktarda olması nedeniyle ön ısıtma işlemi dizel yakıt ile yapılmıştır.
2. Kararlı hale gelen motor kapatılarak yakıt deposu ve yakıt hattındaki dizel yakıt temizlenmiş ve daha sonra deneyi yapılacak olan yakıt, yakıt deposuna konulmuştur. Deney yapılacak yakıt, bir karışım (B20 veya B50) ise karışım ilgili oranda hazırlanarak yakıt deposuna konulmuştur.
3. Yakıt deposu terazi üzerine yerleştirilmiş ve motor 5 dakika süreyle (silindir içerisindeki dizel yakıt kalıntılarının da temizlenmesi amacıyla) test yapılacak yakıt ile çalıştırılmıştır.
4. Motor devri, yaklaşık 800-1000-1200-1400-1600-1800 ve 2000 dev/dak olacak şekilde yedi farklı devir sayısına ayarlanarak motor çalıştırılmış ve elde edilen verilen kaydedilmiştir. Her deney üç defa tekrar edilmiştir.
5. Motorun soğukta çalışma performans testleri için motor ünitesinin bulunduğu ortam soğutulmuştur. Soğutma işleminde, motor bloku ortam havası ile kararlı hale geldikten sonra motor çalıştırılmış ve motorun çalışma yeteneği tespit edilmiştir.

3.4. Wavelet Analiz Testleri

Motor deneylerinde kullanılan yakıt çeşitlerinden elde edilen silindir içi basınç değerleri kullanılarak, silindir içi basınç değişimlerinden çevrimsel farklar analiz edilmiştir. Anazli metodu olarak Wavelet Analiz yöntemi kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar bölüm 4.4’de detaylı olarak incelenmiştir.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

İçten yanmalı dizel motorlara alternatif yakıt araştırmasının amaçlandığı bu çalışmada, referans yakıtımız dizel yakıt olduğu için alternatif yakıtlardan elde edilen bütün sonuçlar dizel yakıt ile karşılaştırılacak ve avantajları-dezavantajları değerlendirilecektir. Dizel motorlarda yanma işlemi birçok parametrenin (viskozite, setan sayısı, tutuşma gecikmesi, moleküle yapısı vs.) etkisinde altındadır. Bu nedenle yakıtlardan elde edilen sonuçların tek bir parametreyle ilişkilendirilmesi doğru olmayacaktır.

Deneylerde yakıt olarak; üretilen beş farklı çeşit biyodizel numunelerinin dizel yakıt ile farklı oranlarda karıştırılmasıyla elde edilen B20, B50 yakıtları ve karışimsız haldeki biyodizel numuneleri (B100) kullanılmıştır. Her bir deneyin üç defa tekrar edilerek tespit edildiği sonuçlar karşılaştırılmalı olarak dört farklı kısımda incelenmiştir.

- Fiziko-kimyasal özellikler: Üretilen beş farklı çeşit biyodizel numunesi ve onların üretiminde hammadde olarak kullanılan bitkisel yağların fiziko-kimyasal özellikleri, dizel yakıt ile karşılaştırılmıştır.
- Motor karakteristikleri: B20, B50 ve B100 yakıtlarının dizel motorda kullanılması durumunda elde edilen motor karakteristiklerinin, parametrelerinin dizel yakıtı göre değişimi incelenmiştir.
- Egzoz emisyonları: B20, B50 ve B100 yakıtlarının dizel motorda kullanılması durumunda elde edilen egzoz emisyon, değerlerinin dizel yakıtı göre değişimi incelenmiştir.
- Çevrimsel Farklar: B20, B50 ve B100 yakıtlarının dizel motorda kullanılması durumunda elde edilen silindir içi basınç verilerindeki farklılıklar (çevrimsel farklar) Wavelet Analiz Metodu kullanılarak analiz edilmiştir. Bu analiz ile hem çevrimsel farkların oluşum oranını hem de dizel motora göre değişim miktarını tanımlanmıştır.

Bundan sonraki kısımda deneylerde kullanılan biyodizel numuneleri ve bitkisel yağların hem dizel yakıtla hem de kendi aralarında karşılaştırmaları çok daha yoğun bir şekilde yapılacağı için aşağıdaki kısaltmalar tanımlanmıştır.

- Biyodizeller metil ester şeklinde tanımlanacak ve ME ile gösterilecektir.
- Bitkisel yağlar BY harfi ile dizel yakıt DY harfi ile gösterilecektir.
- Karışımlar biyodizel yüzdesini gösterecek şekilde B20, B50 veya B100 şeklinde tanımlanacaktır
- Yağ çeşitleri ilk harfleri kullanılarak (A,S,F,K,M harfleri ile) isimlendirilecektir. Örneğin; soya yağı metil esteri SME şeklinde ve soya bitkisel yağı SY şeklinde kısaltılacaktır.

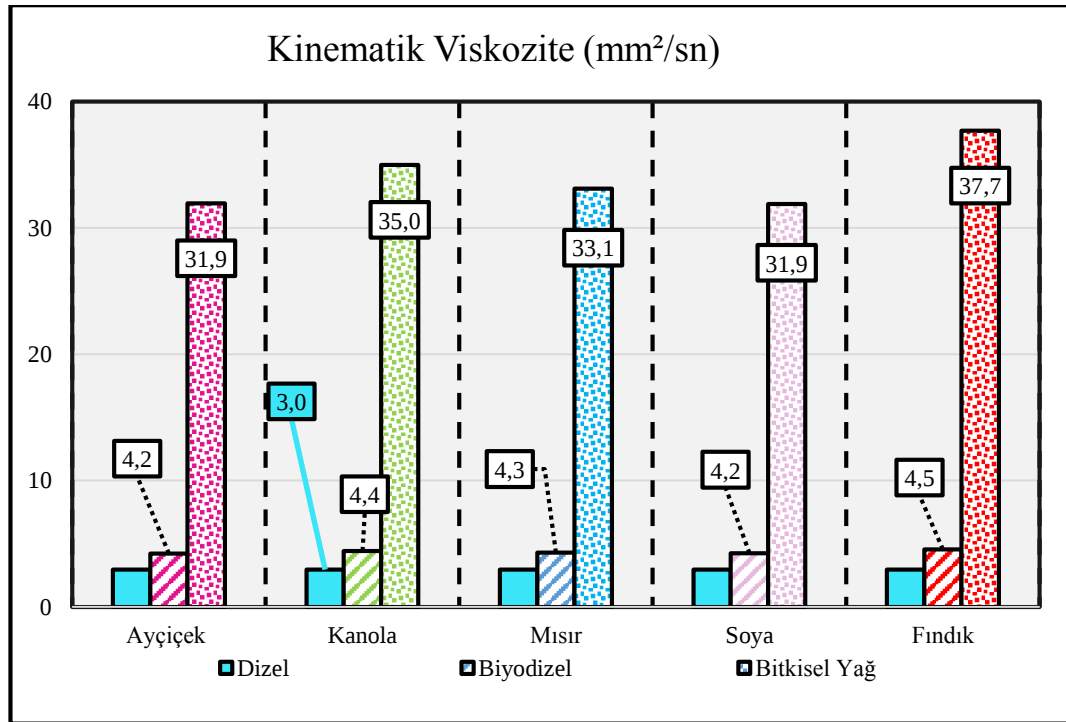
4.1. Fiziksel ve Kimyasal Özellikler

Viskozite: İçten yanmalı dizel motorlarda yakıtın, depo ve yanma odası arasındaki akışı, yanma odasındaki dağılımı, hava ile karışımı düşünüldüğü zaman viskozitenin yanma kalitesi açısından çok önemli olduğu ortaya çıkmaktadır. Bitkisel yağların her ne kadar da 1900’lü yıllarda içten yanmalı motorlara alternatif olabileceği ifade edilmiş olsa dahi, yüksek viskozitesi nedeniyle uzun süreli kullanımı, acil durumlar dışında olmamıştır. Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde, bitkisel yağların kullanımı özellikle kısa süreli birçok araştırma çalışmasında (Pryde 1983; Ramadhas *et al.* 2004; Graboski and McCormick 1998; Ma and Hanna 1999; Agarwal 2007) karşımıza çıktığı görülmektedir. Zaman içinde bitkisel yağların yüksek viskozitesini azaltmayı hedefleyen çalışmalar (Chang and Wan 1947; Pramanik 2003; Altun ve Gür 2005; Karhale *et al.* 2008; Canakci *et al.* 2009) sonucunda biyodizel elde edilmiştir.

Biyodizel üretiminde kullanılan bitkisel yağların viskozite değerlerindeki değişimi görmek ve dizel yakıtla karşılaştırmak amacıyla hazırlanan Şekil 4.1’de; biyodizel numuneleri, bu numunelerin elde edildiği bitkisel yağlar ve dizel yakıtın viskozite değerleri görülmektedir. Değerler incelendiği zaman; BY’ların viskozite değerlerinin DY’tan 10-13 kat daha fazla olmasına rağmen üretilen biyodizel numunelerinin viskozite değerlerin DY’tan en fazla 1,6 kat fazla olduğu görülmektedir. Örneğin; FY’na ait viskozite değeri dizel yakıttan 12,8 kat daha fazla iken, FY’dan elde edilen FME, DY’tan sadece 1,5 kat daha yüksek viskoziteye sahiptir. Kullanılan biyodizel numuneleri arasında

viskozite değeri açısından en uygun olan biyodizel numunesinin 4,2 mm²/sn değerine sahip AME, SME ve MME olduğu görülmektedir. Literatürde yapılan birçok çalışmada da (Ma and Hanna 1999; Srivastava and Prasad 2000; Agarwal 2007; Lapuerta *et al.* 2008; Sahoo *et al.* 2009; Buyukkaya 2010; Colaço *et al.* 2010; Karmakar *et al.* 2010; Atabani *et al.* 2012; Hoekmana *et al.* 2012; Mofijur *et al.* 2013; Yücesu and İlkiliç 2013) benzer oranları görmek mümkündür.

Bir alternatif yakıtın, dizel yakıttan çok yüksek viskoziteye sahip olması sistemin çalışmasında çeşitli problemlere (kötü atomizasyon, koklaşma vs.) yol açacağı gibi, çok düşük viskoziteye sahip olması da yakıt hattında çeşitli kayıplara neden olacaktır. Bu nedenle yakıtın viskozite değerinin, mevcut motor sistemlerinde dizel yakıtın viskozite değerine yakın olması istenir.



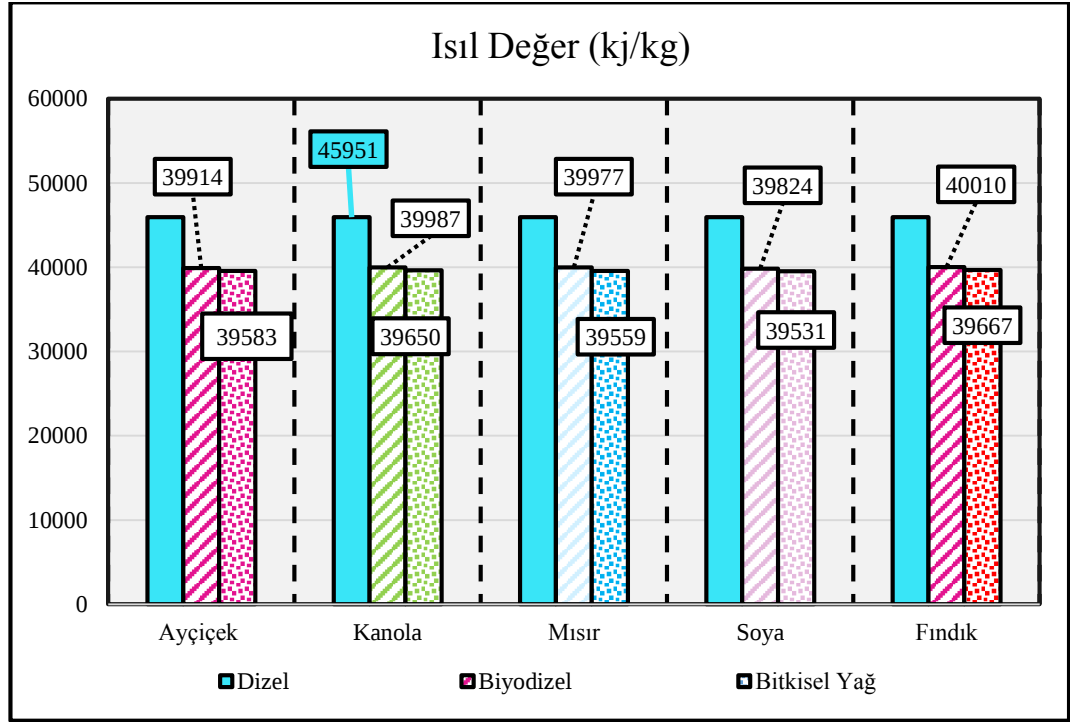
Şekil 4.1. Viskozite değerlerinin karşılaştırılması

Isıl değer: Yakıtın viskozitesi sistemin problemsiz bir şekilde uzun süreli çalışabilmesi için önemli bir parametre iken, yakıtın ısı değeri yapılan çalışmanın ne kadar uygun

olduğunu ve ne oranda etkili çalıştığını gösteren bir parametredir. Bir maddenin (katı, sıvı, gaz) yakıt olarak değerlendirilmesi ve uygunluğunun incelenebilmesi için ısı kapasitesinin olması gerekmektedir. Bitkisel yağlar da bu özelliği nedeniyle dizel yakıtı alternatif yakıt olabileceği düşünülmüş ve bitkisel yağların kullanımı ile ilgili yapılan çalışma neticesinde biyodizele ulaşılmıştır.

Üretilen biyodizel numunelerinin uygunluğunun değerlendirilmesi ve elde edilebilecek sonuçlar hakkında ön fikir sağlanması amacıyla, yakıtların ısı verim değerleri tespit edilmiştir. Bu değerler Şekil 4.2’de görülmektedir. Değerler incelendiği zaman; dizel yakıtın ısı veriminin biyodizel ve BY’dan daha yüksek olduğu görülmektedir. BY’lar içerisinde en düşük ısı değeri 39531 kcal/h değeri ile SY’na, en yüksek ısı değeri 39667 kcal/h değeri ile FY’na aittir. Biyodizel numuneleri arasında en düşük değere 39824 kcal/h ile SME’ne, en yüksek ısı değeri 40010 kcal/h ile FME’ne aittir. Bu nedenle dizel yakıtın ısı değeri en fazla bitkisel yakılardan %1,16 ve biyodizel numunelerinden %1.15 daha fazladır. Yapılan çalışmada seçilen biyodizel numuneleri arasında ısı enerjisinin dizel yakıtı en yakın olduğu yakıtın FME olduğu, fakat KME ve MME numunelerinin de bu değere çok yakın olduğu görülmektedir. BY ve ME’lerine ait benzer oranlardaki ısı değerleri; Srivastava and Prasad 2000; Agarwal 2007; Lapuerta *et al.* 2008; Sahoo *et al.* 2009; Buyukkaya 2010; Karmakar *et al.* 2010; Atabani *et al.* 2012; Hoekmana *et al.* 2012; Mofijur *et al.* 2013; Yücesu and İlkiliç 2013 çalışmalarında görmek mümkündür.

İçten yanmalı motorlara kullanılabilecek alternatif enerji kaynağının uygunluğunun araştırıldığı bu çalışmada incelenen yakıtların ısı verimlerinin maksimum olması istenilen bir durumdur. Ancak sistemde özellikle yanma odasında kullanılan malzemenin ısı dayanımı göz önüne alındığında bu değerin malzeme dayanımı ile sınırlı olduğu görülmektedir.



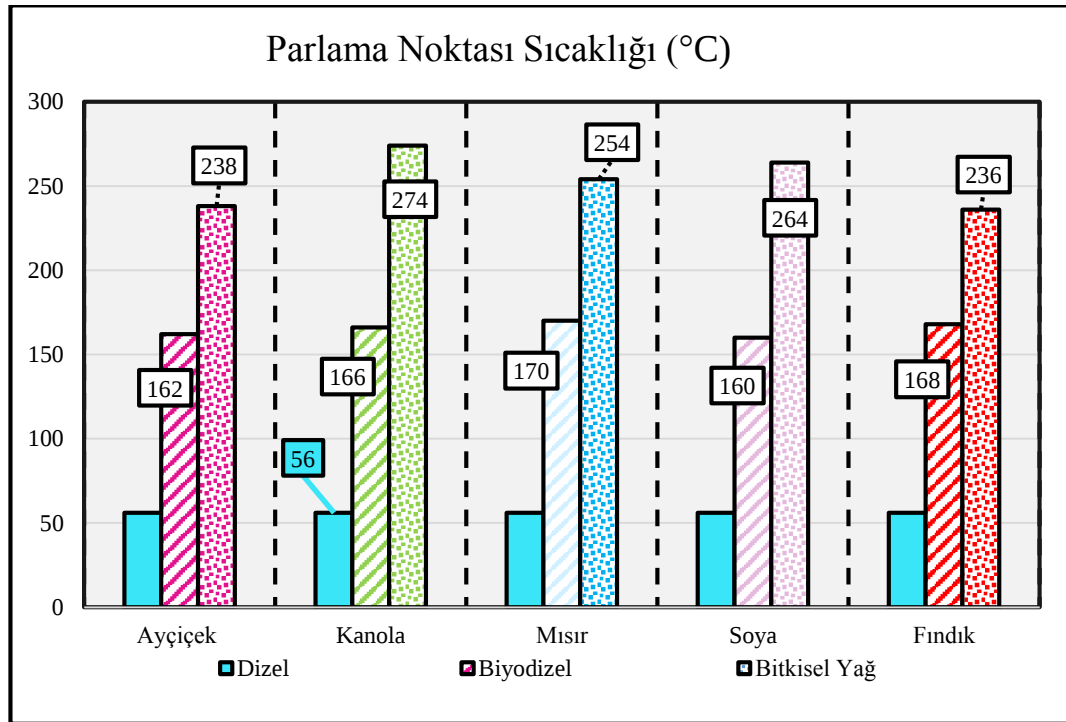
Şekil 4.2. Isıl değerlerin karşılaştırılması

Parlama Noktası Sıcaklığı: Yakıt buharının alev ile temas ettiği sıcaklıktaki davranışını tanımlayan bu değer, buharlaşmanın her sıcaklıkta olduğu düşünüldüğünde özellikle düşük parlama noktası sıcaklığına sahip yakıtlarda çok önemlidir. Bu değer yüksek olması, yakıtın yanmaya karşı direncinin yüksek ve taşınabilirliğinin iyi olduğunu gösterir. Yakıt hem tüketiciye ulaştırılması amacıyla hem de araçta kullanılması esnasında depolanma gerektirdiği için yakıt güvenliği açısından önemli bir değerdir ve bu değer yüksek olması istenilir.

Dizel, biyodizel ve bitkisel yağlara ait parlama noktası sıcaklık değerleri Şekil 4.3’de gösterilmektedir. Değerler incelendiği zaman, en yüksek alevlenme noktası sıcaklığına bitkisel yağların sahip olduğu görülmektedir. Kullanılan bitkisel yağların parlama noktası sıcaklık değerleri 236-274°C aralığında değişirken, bitkisel yağlardan üretilen biyodizel numunelerine ait parlama noktası sıcaklık değerlerinin 162-170°C aralığında değiştiği görülmektedir. Bitkisel yağların parlama noktası sıcaklığı dizel yakıtlardan ortalama yaklaşık 5 kat daha büyük değere sahip iken bu oran biyodizel numunelerinde yaklaşık 3

kattır. Yani biyodizel dizel yakıtla daha güvenli, bitkisel yağlar ise en güvenli yakıt çeşididir. En güvenli bitkisel yağ, KY iken en güvenilir biyodizel MME'dir.

Literatürdeki yapılan çalışmalar incelendiği zaman, parlama noktası sıcaklık değerlerinde bazı farklılıklar tespit edilmiştir. Bu durumun muhtemel sebebinin, çeşitli kaynaklardan elde edilen hammaddenin saflık derecelerinin aynı olmamasıdır. Srivastava and Prasad 2000; Agarwal 2007; Sahoo *et al.* 2009; Buyukkaya 2010; Karmakar *et al.* 2010; Atabani *et al.* 2012; Mofijur *et al.* 2013 çalışmalarında da benzer oranlarda parlama noktası sıcaklık değerleri ile karşılaşmak mümkündür.

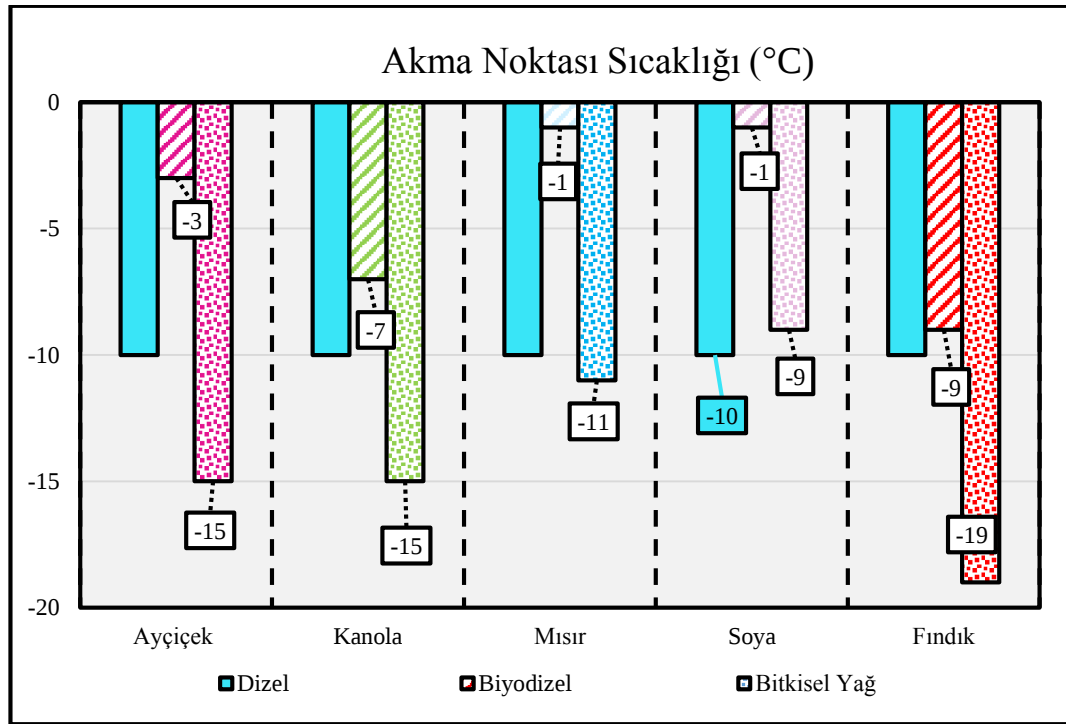


Şekil 4.3. Parlama noktası sıcaklık değerlerinin karşılaştırılması

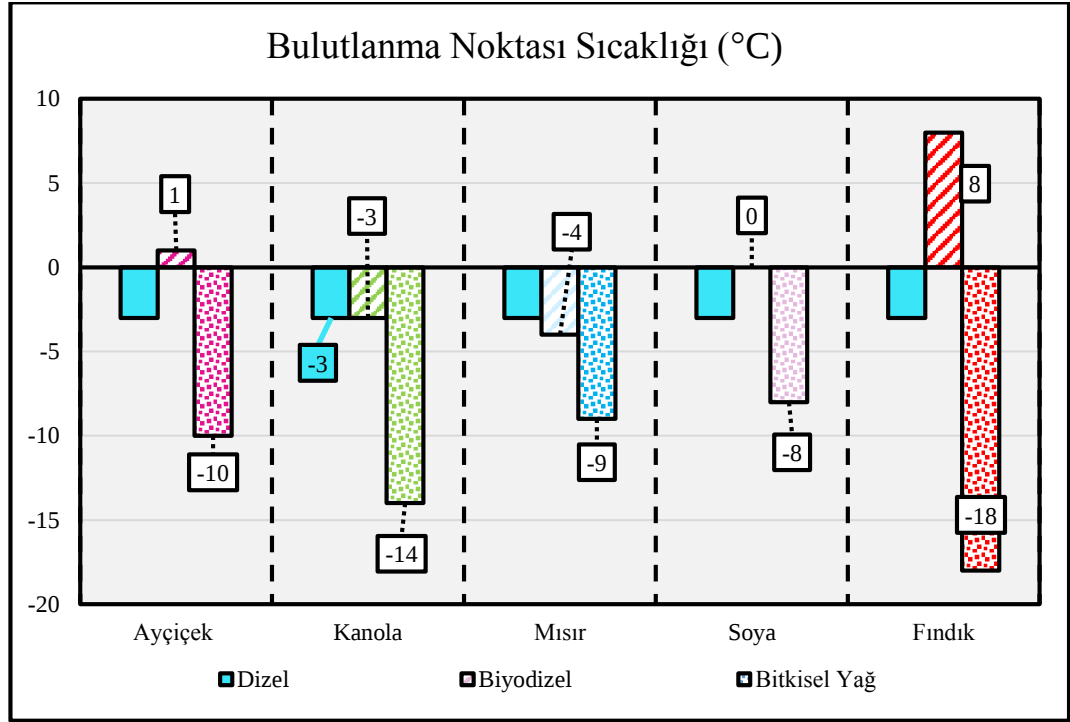
Düşük sıcaklık akma özellikleri: Bu özelliği tanımlayan üç farklı sıcaklık değeri vardır. Bunlar; akma noktası sıcaklığı, bulutlanma noktası sıcaklığı, soğuk filtre tıkanma noktası sıcaklığıdır. Her üç sıcaklık değeri de yakıtın soğuk hava şartlarındaki davranışını tespit etmek amacıyla kullanılır. Bu değerlerin yeterince (iklim şartlarına göre) düşük olması motorun soğuk havalarda kolay çalışabileceği anlamına gelir. Motor karakteristiklerine

direk etki etmeyen bu özellikler, bir yakıtın herhangi bir bölgede kullanılıp kullanılmayacağı hakkında bilgi verir. Her üç değerin de oldukça küçük olması, yani soğuk havalara karşı yakıtın mukavemetli olması arzu edilen bir durumdur.

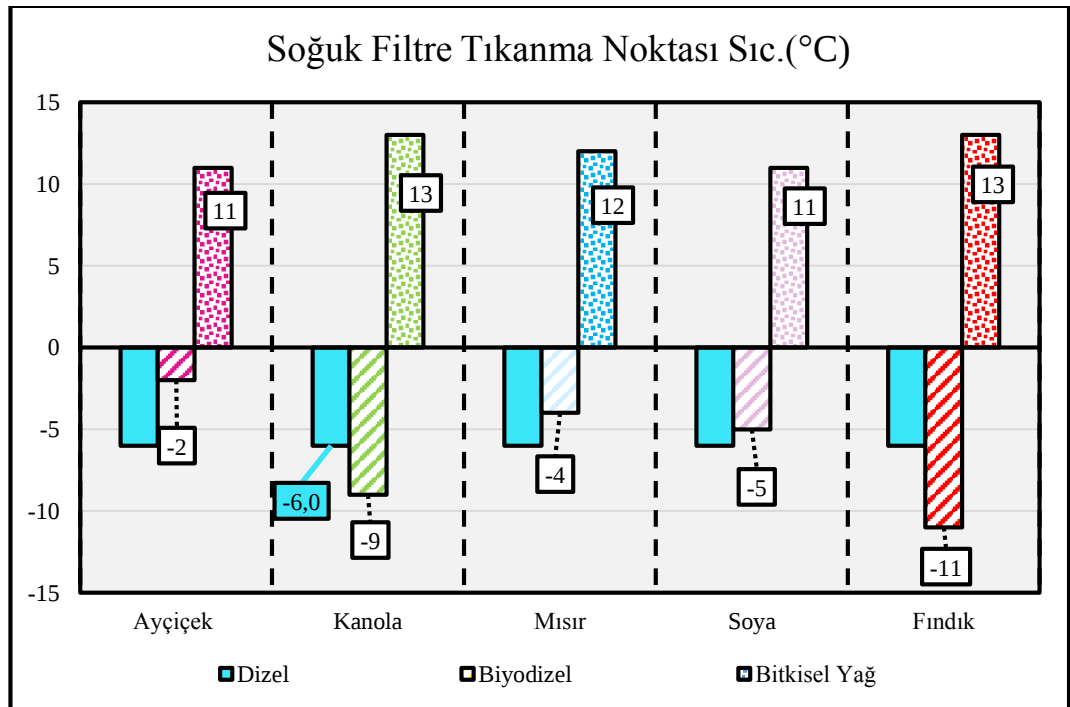
Dizel, biyodizel ve bitkisel yağlara ait akma noktası sıcaklık değerlerinin karşılaştırılması Şekil 4.4’de, bulutlanma noktası sıcaklık değerlerinin karşılaştırılması Şekil 4.5’de ve soğuk filtre tıkanma noktası sıcaklık değerlerinin karşılaştırılması Şekil 4.6’da gösterilmektedir. Yakıtın, yakıt deposundan yanma odasına akışı esnasında yapısındaki kiralleşme nedeniyle filtrelerden geçmeyip filtreyi tıkama sıcaklığını ifade eden soğuk filtre tıkanma sıcaklığı incelendiği zaman; bitkisel yağların bu özelliklerinin çok kötü olduğu görülmektedir.



Şekil 4.4. Akma noktası sıcaklık değerlerinin karşılaştırılması



Şekil 4.5. Bulutlanma noktası sıcaklık değerlerinin karşılaştırılması



Şekil 4.6. Soğuk filtre tıkanma noktası sıcaklık değerlerinin karşılaştırılması

CFPP sıcaklık değeri kullanılan bitkisel yağlarda 11-15°C aralığında değişirken, biyodizel numunelerinde -2°C ile -11°C aralığında değiştiği görülmektedir. Bu nedenle bitkisel yağlara oranla biyodizelin soğuk hava davranışı nispeten daha iyidir. Biyodizel numuneleri arasında soğuk iklim şartlarına dayanımının -11°C CFPP değeri ile FME, en dayanıksız olan biyodizelin de -2°C CFPP değerine sahip AME olduğu görülmektedir. Benzer oranları; Srivastava and Prasad 2000; Agarwal 2007; Sahoo *et al.* 2009; Buyukkaya 2010; Karmakar *et al.* 2010; Atabani *et al.* 2012; Mofijur *et al.* 2013 çalışmalarında görmek mümkündür.

4.2. Motor Karakteristikleri

Biyodizel yaklaşık %10 oksijen içeriği nedeniyle aynı miktardaki dizel yakıtına oranla daha yüksek yoğunluğa ve daha düşük ısı enerjisiye sahiptir. Bu nedenle motorda herhangi bir değişiklik yapılmadan biyodizel kullanılan bir dizel motorunda; motor performansları aynı gücün elde edildiği dizel yakıt ile karşılaştırıldığı zaman, yakıt tüketiminin fazla olmasına rağmen aynı miktardaki yakıt tüketiminin dikkate alınarak yapıldığı karşılaştırmada üretilen gücün azalacağı aşikârdır. Ancak motor karakteristiklerinin tespitinde; yakıt viskozitesi, yoğunluk, yakıtın tutuşma sıcaklığı da çok önemlidir. Bu nedenle motor karakteristiklerindeki değişimin nedenini, sadece oksijen içeriğiyle veya ısı enerjisi oranıyla ilişkilendirmek yeterli olmaz. Her parametrenin birlikte değerlendirilmesi gerekmektedir.

Motor karakteristik deney çalışmaları iki farklı şekilde ele alınmıştır.

1. DY, B20, B50 ve B100 yakıtları kullanılması durumundaki motor performans değerleri (efektif güç, efektif yakıt tüketimi ve efektif verim) karşılaştırılmıştır.
2. Biyodizel kullanılması durumundaki etkinin daha belirgin olarak gözlemlenebilmesi için; B20, B50 ve B100 yakıtlarının kullanılması durumunda elde edilen değerlerin dizel yakıt kullanılması durumundaki değerlere göre yüzdesel değişimleri incelenmiştir.

Efektif güç: Benzinli motorlarla kıyaslanınca dizel motorların en büyük özelliğinin yüksek güçleri olduğu bilinmektedir. Bu nedenle dizel yakıtın yerine alternatif olabilecek bir yakıttan beklenen özellik de elbette ki yüksek güçtür. Yakıtın ısı enerjisi sahip olduğu güç hakkında ön bilgi vermesine rağmen, yakıtın diğer özellikleri de yanmanın kalitesini etkilemekte ve elde edilen gücü değiştirebilmektedir.

Üçüncü bölüm motor testleri kısmında detaylı olarak anlatılan motor deneylerinde kullanılan her bir yakıt çeşidine ait efektif güç değerleri Şekil 4.7’de gösterilmektedir. Değerler incelendiğinde;

- Devir sayısının artmasıyla elde edilen gücün arttığı ve dizel yakıtın; B20, B50, B100 yakıtlarından daha yüksek olduğu görülmektedir. Örneğin dizel yakıtın tüm devirlerdeki ortalama güç değeri 2.58 kW iken, bu değere en yakın olan B20 karışımında 2.55 kW değeri ile FME, B50 karışımında 2.53 kW değeri ile yine FME ve B100 yakıtında 2.56 kW değeri ile SME takip etmektedir.
- Karışımındaki biyodizel oranı arttıkça elde edilen güç değeri de artmaktadır. Örneğin; 1600 dev/dak değerindeki SME için B50 ve B100 değerlerinin B20 değerine göre artma miktarı %3.5 ve %11.5’dir. Benzer şekilde 1800 dev/dak değerindeki KME için bu oranlar %12.5 ve %12.8 dir.

Yakıt çeşitlerinin artan devir sayısına göre efektif güç değişiminin ve biyodizel numuneleri ile dizel yakıt arasındaki ilişkinin daha net bir şekilde görülebilmesi amacıyla hazırlanan Şekil 4.8’de, efektif güç değerlerinin tüm biyodizel yakıt çeşitleri ile dizel yakıt arasındaki fark görülmektedir. Değerler incelendiğinde;

- Biyodizel kullanılması durumunda dizel yakıtla oranla güçte azalma olduğu açık bir şekilde görülmektedir. Azalma miktarı motor devrinin artmasıyla azalmaktadır. Örneğin; 1200 dev/dak devir değerindeki tüm yakıt çeşitlerinin B20 karışımındaki ortalama değeri %10.6, B50’de ortalama %14, B100’de ortalama %11.4; 1400 dev/dak devir için bu değerler sırasıyla %8.5, %11.7, %8.7 ve benzer şekilde 2000 dev/dak devir için de %7.7, %5.7, %1.4’dir. Devir sayısı arttıkça yanma için gerekli olan birim zamanda ki yakıt miktarı da artacaktır. Biyodizelin yüksek viskozitesi, yakıtın hem yakıt deposundan yanma odasına hareketini geciktirecek hem de yanma odası içinde azalan sıkıştırma

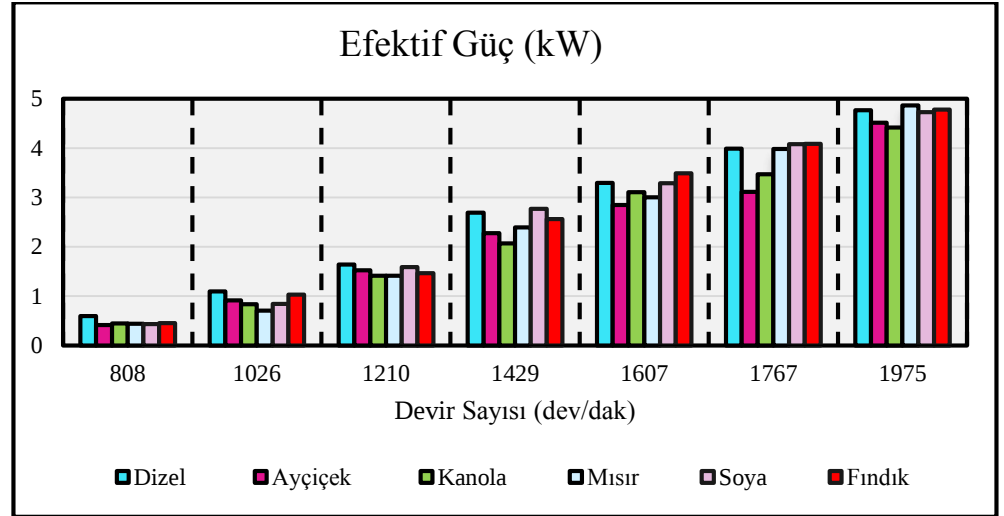
stroku zamanı nedeniyle daha az atomize olacaktır. Daha az atomize olan yakıtta daha kötü yanma sağlayacak ve güç değeri azaltacaktır.

- Biyodizel numunelerinden alınan sonuçlar genel olarak birbirine yakın ve uyumludur. Ancak özellikle 1600-1800 ve 2000 dev/dak devir sayılarında azalma miktarının belirgin bir şekilde azaldığı hatta bu devir sayılarında SME, FME v MME de efektif güç değerinde artış olduğu saptanmıştır. Ancak devir sayısı ve bu artış miktarı ile ilgili lineer bir ilişki kurulamamıştır.
- Karışım oranı ile güç azalması arasında lineer bir ilişki kurulamamıştır.

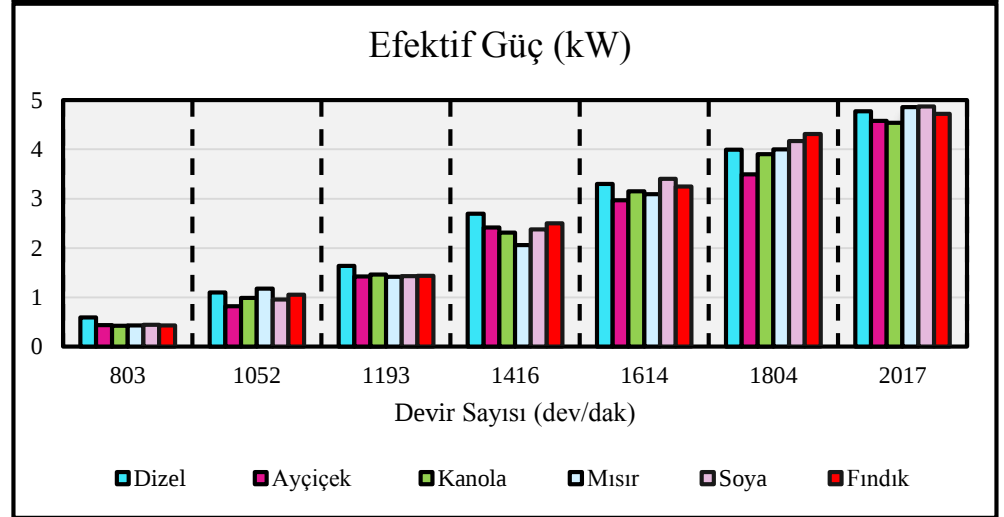
Dizel yakıt güç ortalama değerinin 2.58 kW olduğuna göre kullanılan biyodizel numune çeşitleri arasında elde edilen güç değerinin ortalamasına bakılarak en güçlü yakıtın B20'de FME (2.55 kW), B50'de FME (2.53 kW) ve B100'de SME (2.56 kW) olduğu görülmektedir. Efektif güç değişiminde FME'nin en güçlü olmasının nedeni; en yüksek ısı değeri ve setan sayısına sahip olması görülebilir.

Dizel motorlarda biyodizel kullanılmasına bağlı olarak oluşan güç kaybını; Graboski *et al.* 1996; Altın *et al.* 2001; Sharp *et al.* 2000; Agarwal 2007; Haşımoğlu *et al.* 2008; Enweremadu and Rutto 2010; Chuepeng 2011; Yücesu *et al.* 2013; yayınlarında da görmek mümkündür.

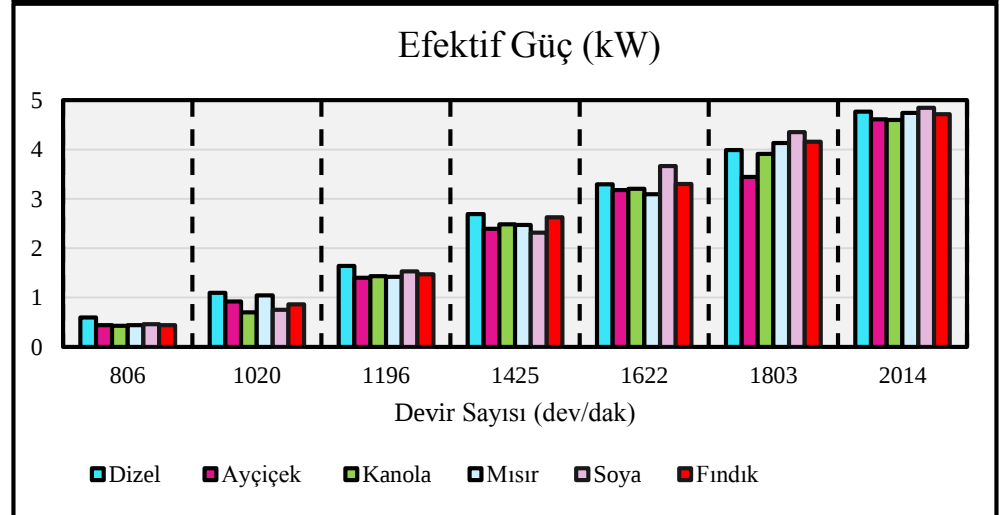
(a)



(b)

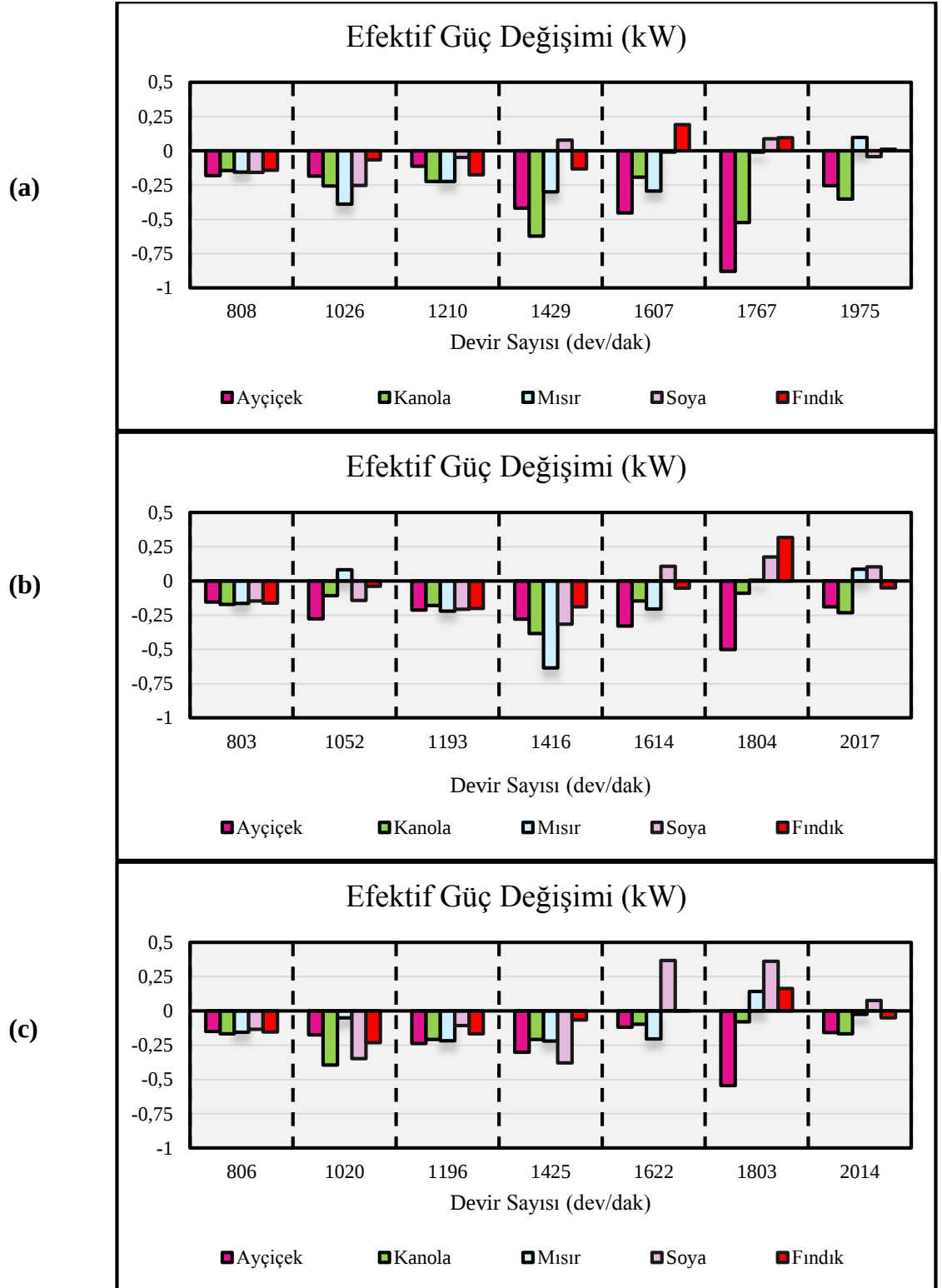


(c)



Şekil 4.7. Yakıtların efektif güç değerleri

* (a)B20 karışımı (b)B50 karışımı (c)B100 yakıtı



Şekil 4.8. Efektif güç değerlerindeki değişim miktarları

* (a)B20 karışımı (b)B50 karışımı (c)B100 yakıtı

Efektif yakıt tüketimi: Dizel yakıtlar için önemli bir parametre olan motor gücü değerlendirirken, motorun o gücü elde ederken tükettiği yakıt miktarını da göz önünde bulundurmak gerekmektedir. Bu tüketimi standart bir şekilde tanımlayabilmek için birim güç başına tüketilen yakıt miktarını (efektif yakıt tüketimi) incelemek gerekmektedir.

Sırasıyla B20, B50 ve B100 yakıtlarının kullanılarak elde edildiği gücün ve tüketilen yakıt miktarının birlikte değerlendirildiği efektif yakıt tüketimi Şekil 4.9’da gösterilmektedir. Değerler incelendiğinde;

- Bütün yakıt çeşitlerinde efektif yakıt tüketim değerlerinin, genel olarak devir sayısının artmasıyla azaldığı görülmektedir. Örneğin B20 karışımındaki AME değerleri 1086 gr/kWh değerinde 335 gr/kWh değerine düşmekte, benzer şekilde B50 karışımı için 1092 gr/kWh den 277 gr/kWh değerine azalmaktadır.
- Karışımındaki biyodizel yüzdesi arttıkça yakıt tüketim değerleri de artmaktadır. Örneğin 1400 dev/dak devir sayısındaki MME, B20 karışımında 405 gr/kWh iken B50 karışımında 481 gr/kWh ve B100 yakıtında 484 gr/kWh değerini almaktadır.

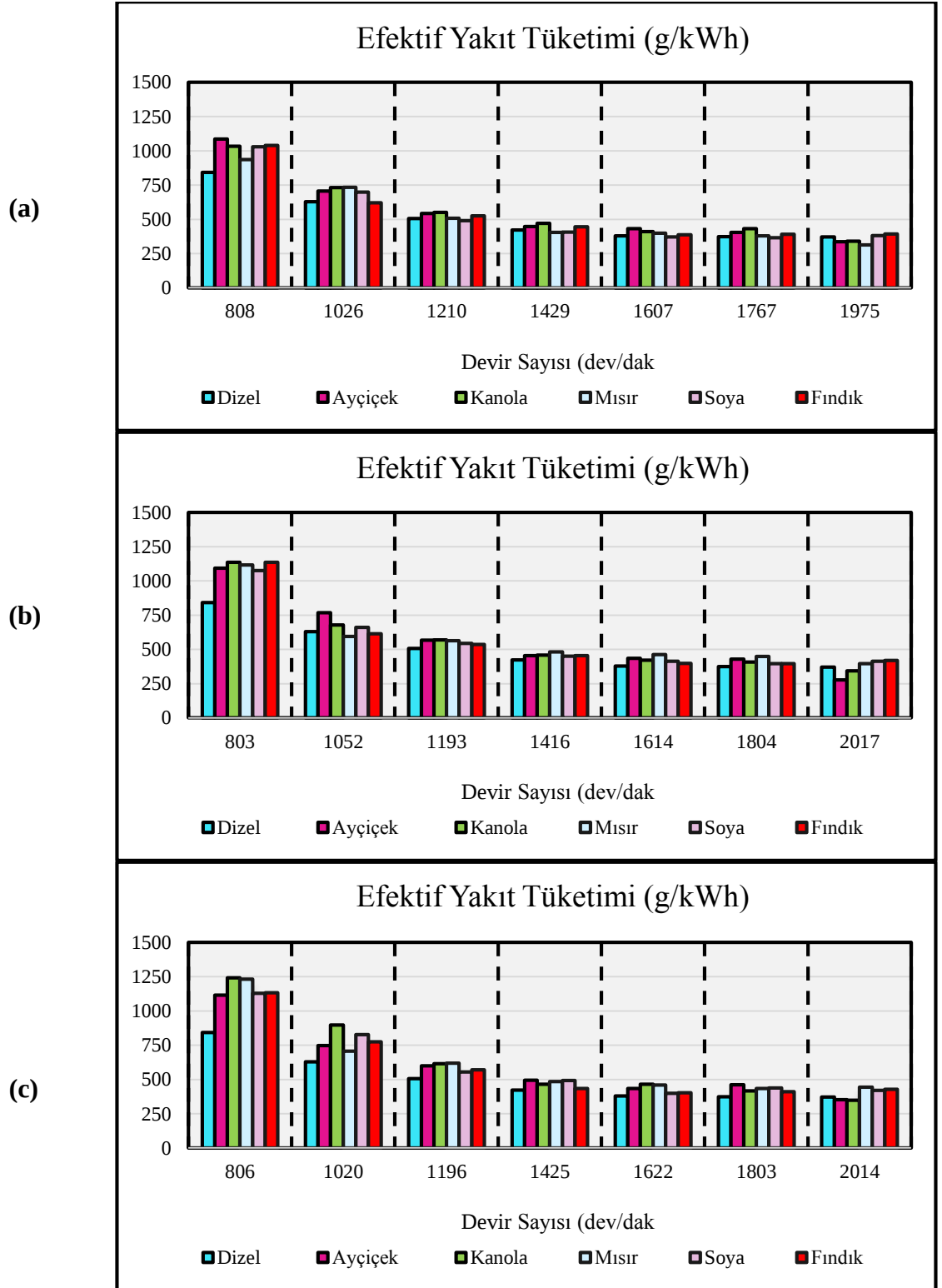
Yakıt çeşitlerinin artan devir sayısına göre efektif yakıt tüketim değişiminin ve biyodizel numuneleri ile dizel yakıt arasındaki ilişkinin daha net bir şekilde görülebilmesi amacıyla hazırlanan Şekil 4.10’da, efektif yakıt tüketim değerlerinin tüm biyodizel yakıt çeşitleri ile dizel yakıt arasındaki farkı görülmektedir. Grafik incelendiğinde;

- Biyodizel kullanılması durumunda genel olarak efektif yakıt tüketiminin bütün karışım ve bütün devirlerde arttığı açıkça görülmektedir. Örneğin; 1600 dev/dak devir sayısında dizel yakıtın yakıt tüketimi 379,86 gr/kWh iken KME için bu değer B20 karışımında %8.3, B50 karışımında %11.4 ve B100 yakıtında %22.8 artmıştır. Benzer şekilde bu oranlar FME için sırasıyla %2.1 %4.9 ve %6.2’dir. Bu durumun en temel nedeni, biyodizel yakıtların ısı enerji kapasitelerinin dizel yakıtlardan ortalama % 13 (ayçiçeği %13, kanola %12.9, mısır %13, soya %13.3, fındık %12.9) daha düşük olmasıdır.
- Artış miktarı motor devrinin artmasıyla genel olarak azalmaktadır. Örneğin B100 yakıtındaki MME için efektif yakıt tüketimindeki azalma miktarı 1800 dev/dak değerine kadar %46.3’den %16’ya azalırken, 2000 dev/dak devir sayısında %19.3’e artmaktadır.

- Biyodizel yüzdesinin artmasıyla yakıt tüketiminde artış olduğu görülmektedir. Örneğin 1400 dev/dak devir sayısındaki AME ait yakıt tüketim değerlerindeki fark incelendiği zaman; B50 ve B100 değerlerinin, B20 değerine göre artış miktarları sırasıyla %22 ve %188 iken benzer durumda 1600 dev/dak devir sayısındaki KME için bu değerler %37 ve %173'dir. Bütün biyodizel numunelerinde paralel artışlar görülmektedir. Tüm karışım oranlarında (B20, B50 ve B100) yakıt tüketim miktarının dizel yakıt ile değişim değerleri genel olarak azalmaktadır.

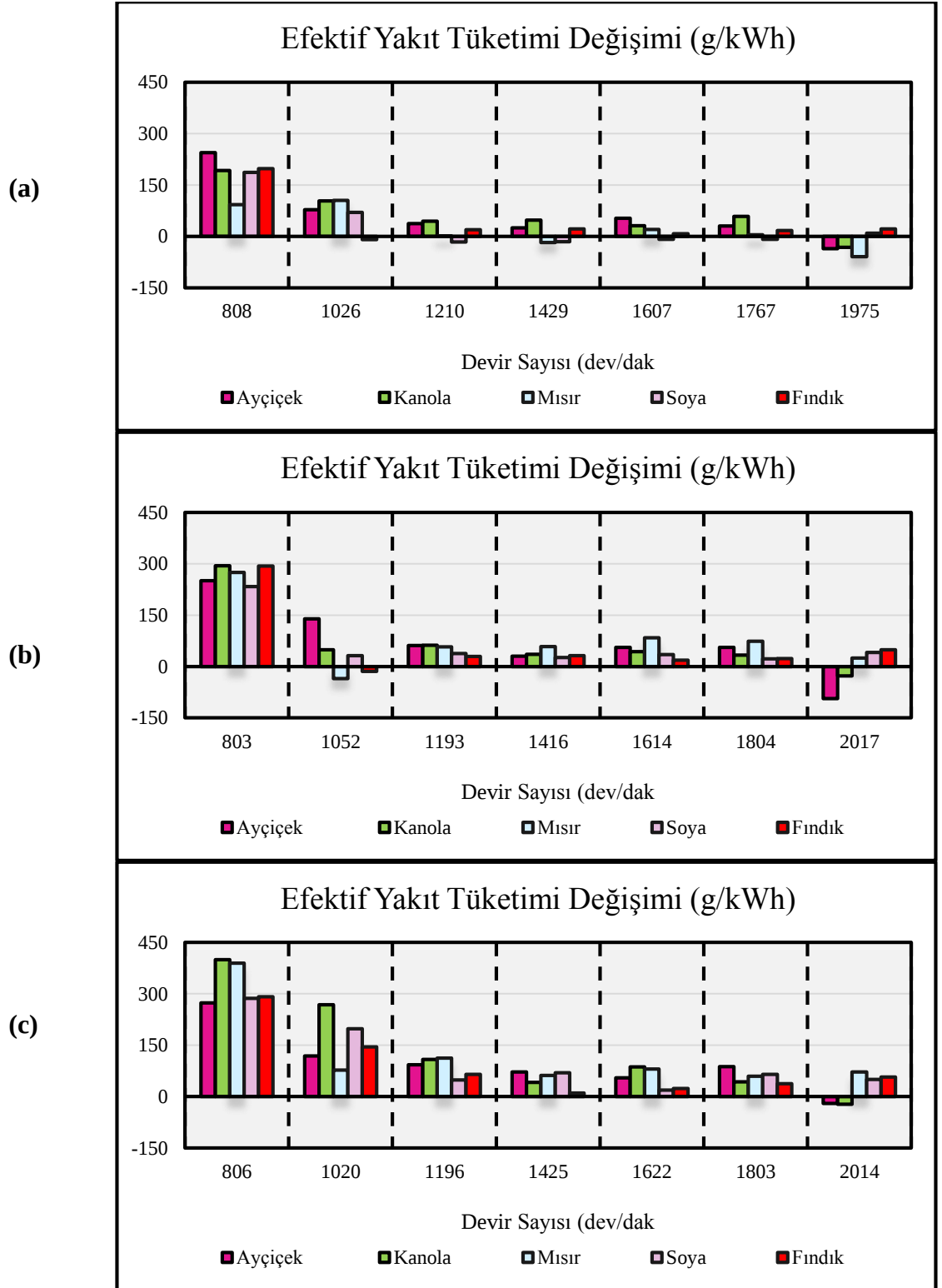
Yakıt tüketimi, yakıtın viskozitesi, yoğunluğu ve ısı değerine bağlı bir büyüklüktür. Biyodizel numunelerinin viskozite değerlerini büyükten küçüğe doğru sıraladığımız da; FME, KME, MME, SME, AME şeklinde sıralanmaktadır. Ancak bu sıralama ile yakıt tüketim miktarları arasındaki ilişki uyumlu değildir. Bu nedenle yakıt tüketim miktarını viskozite, yoğunluk ve ısı enerji miktarıyla birlikte değerlendirmek gerekmektedir. Literatürde yapılan birçok çalışmada (Graboski *et al.* 1996; Sharp *et al.* Jobe 2000; Altın *et al.* 2001; Agarwal 2007; Freed *et al.* 2009; Chuepeng 2011; Yücesu and İlkiliç; 2013) benzer yakıt tüketim oranları görmek mümkündür.

Biyodizel numune çeşitlerinin dizel yakıt ile karşılaştırıldığı bu çalışmada, efektif yakıt tüketim değerinin dizel yakıt en yakın olduğu devir sayısı 1600 dev/dak olarak tespit edilmiştir. Her üç karışım oranında da; SME nin efektif yakıt tüketim değeri en düşük olduğu görülmüştür. SME, en düşük ısı enerjiye sahip olmasına rağmen en az efektif yakıt tüketim değerine sahip olması; en düşük parlama noktasına ve setan sayısına, en yüksek yoğunluğa sahip olması ile açıklanabilir.



Şekil 4.9. Yakıtlara ait özgül yakıt tüketim değerleri

* (a)B20 karışımı (b)B50 karışımı (c)B100 yakıtı



Şekil 4.10. Efektif yakıt tüketim değerlerindeki değişim miktarları

* (a)B20 karışımı (b)B50 karışımı (c)B100 yakıtı

Efektif verim: Bir makine için tanımlanan en genel verim ifadesi olup üretilen gücün tüketilen enerjiye oranı olarak tanımlanmaktadır. Motorlarda ise bu eşitlik, yakılan yakıtın motor tarafından ne kadar etkili kullanıldığını gösteren “efektif güç/yakıt tüketimi” şeklinde ifade edilmektedir. Bu değerın hesaplanmasında her ne kadar da yakıtın ısı enerjisi kullanılıyor olmasına rağmen, gerçekte bu verim değeri; yakıtına uygun olarak tasarlanan bir motorun mekanik verimini (yanma odası hacmi, ateşleme zamanı, enjektör delik çapı, sıkıştırma oranı, strok vs.) de kapsamaktadır. Çalışmamızın çıkış noktası olan “dizel motorlarda herhangi bir değişiklik yapılmaması” prensibi hatırlanacak olursa, bu değerin dizel yakıtı yakın olması arzu edilen bir durumdur. (Bu değerin yüksek olması, modifiye olmayan bir dizel motorunda bazı gerilmelere neden olacağı için istenen bir durum değildir.

Şekil 4.7 ve Şekil 4.9 grafik verileri kullanılarak elde edilen efektif verim değeri, Şekil 4.11’de gösterilmektedir. Grafik incelendiğinde;

- Genel olarak tüm yakıt çeşitlerinin dizel yakıtı paralel bir durum sergilediği ve devir sayısının artmasıyla verim değeri de genel bir artış eğiliminde olduğu görülmektedir.
- Karışımındaki biyodizel yüzdesi arttıkça efektif verim değeri de artmaktadır. Örneğin 1400 dev/dak devir sayısındaki efektif verim değeri KME için B20 yakıtında %17,1 iken, B50’de %18.4 ve B100’de %19.4 dür. Diğer taraftan aynı devir sayısındaki efektif güç değeri sırasıyla 2.1 kW, 2.3 kW, 2.5 kW iken efektif yakıt tüketim değeri sırasıyla 470 gr/kW.h, 459 gr/kW.h ve 464 gr/kW.h’dir.

Yakıt çeşitlerinin devir sayısına bağlı olarak değişimini ve dizel yakıt ile arasındaki ilişkiyi incelemek amacıyla hazırlanan Şekil 4.12’de efektif güç değerlerinin tüm biyodizel yakıt çeşitleri ile dizel yakıt arasındaki farkı görülmektedir. Grafik incelendiğinde;

- Genel olarak efektif verimde bir azalma görülmektedir. Özellikle 800 dev/dak devir sayısında bu azalma miktarı daha da belirginleşmektedir. 1200 dev/dak devir sayısındaki SME için, B100 yakıtının B50 yakıtına göre efektif yakıt tüketimindeki artışı %1.9 iken efektif verimdeki azalması %5.3’dür. Bu durum ayrıca biyodizelin yağlayıcılık özeliği ile

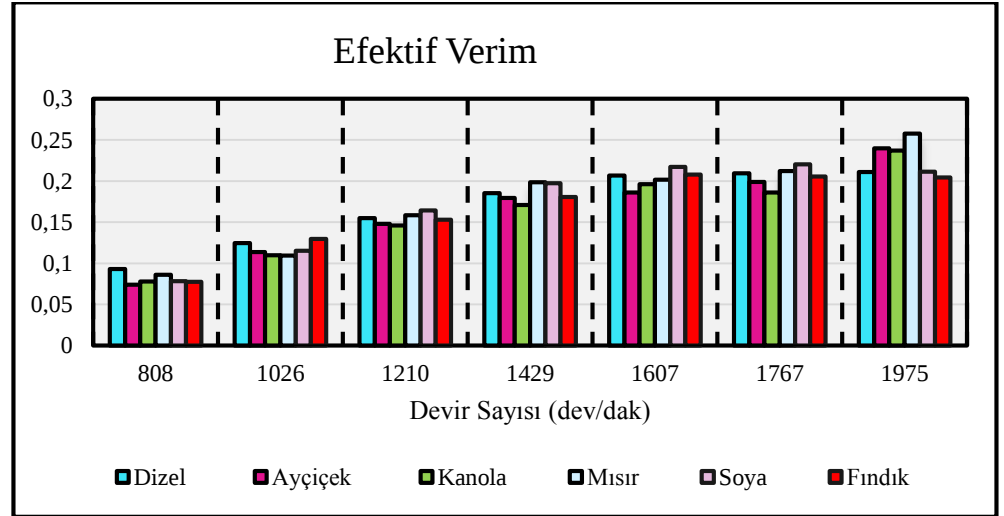
de açıklanabilir. Biyodizelin yağlayıcılık özelliği nedeniyle motordaki mekanik sürtünme kayıpları azalacak ve verim artacaktır.

Efektif yakıt tüketiminde B100 kullanımında değerlerin artış göstermesine rağmen, efektif verimde azalma gözlemlenmemiş aksine artma olmuştur. Bu durum; efektif yakıt tüketimindeki artışın verime direk yansımadığını göstermektedir. Bu durumun muhtemel sebebi ise yakıt bileşeninde bulunan oksijen miktarıdır. Ayrıca yakıtın düşük ısı değeri ve yüksek yoğunluğu da verim artışında etkilidir.

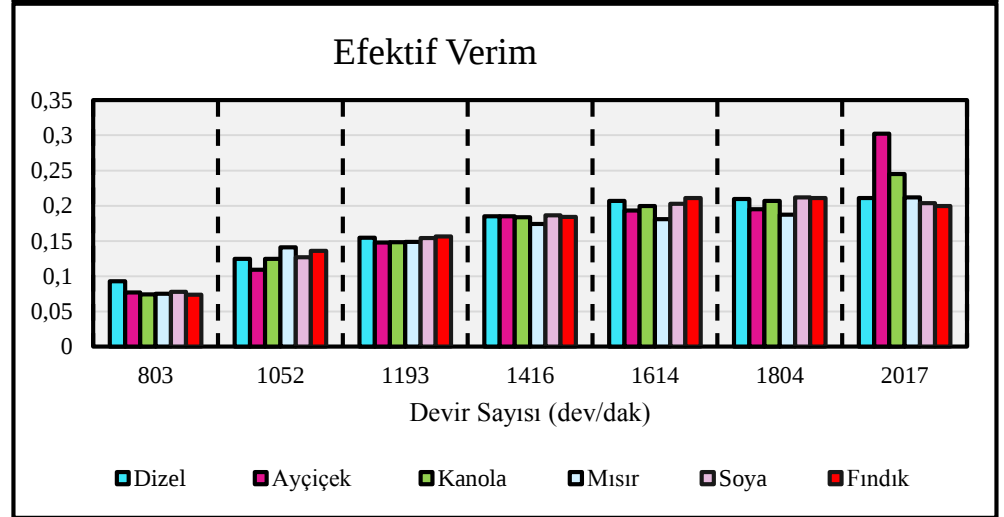
Efektif güç ve efektif yakıt tüketiminin birlikte değerlendirildiği efektif verim de, kullanılan biyodizel numuneleri arasında en uygun yakıtın FME olduğu ve en yüksek verimin 1400 dev/dak devir sayısında elde edildiği görülmektedir.

Çalışmamızda elde etmiş olduğumuz benzer değerleri; Graboski *et al.* 1996; Sharp *et al.* 2000; Enweremadu and Rutto 2010; Chuepeng 2011 çalışmalarında da görmek mümkündür.

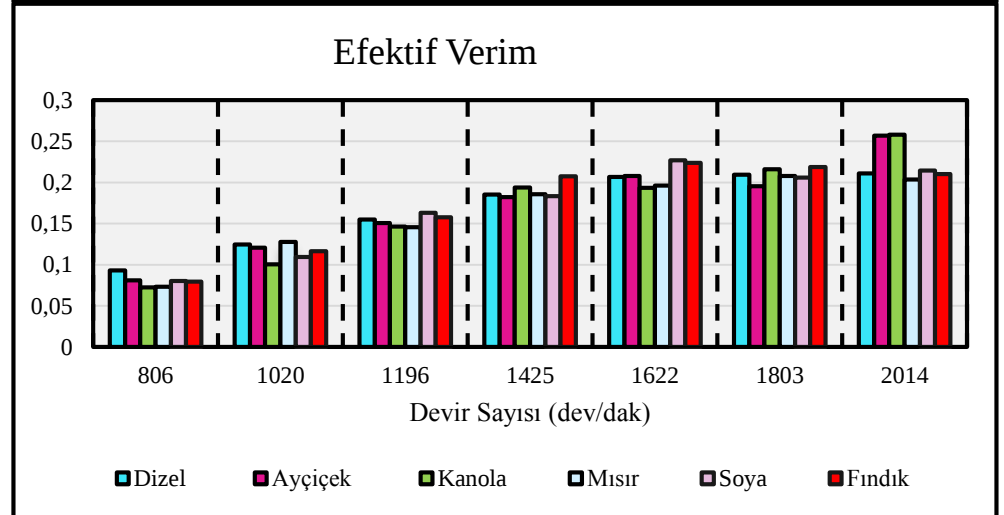
(a)



(b)

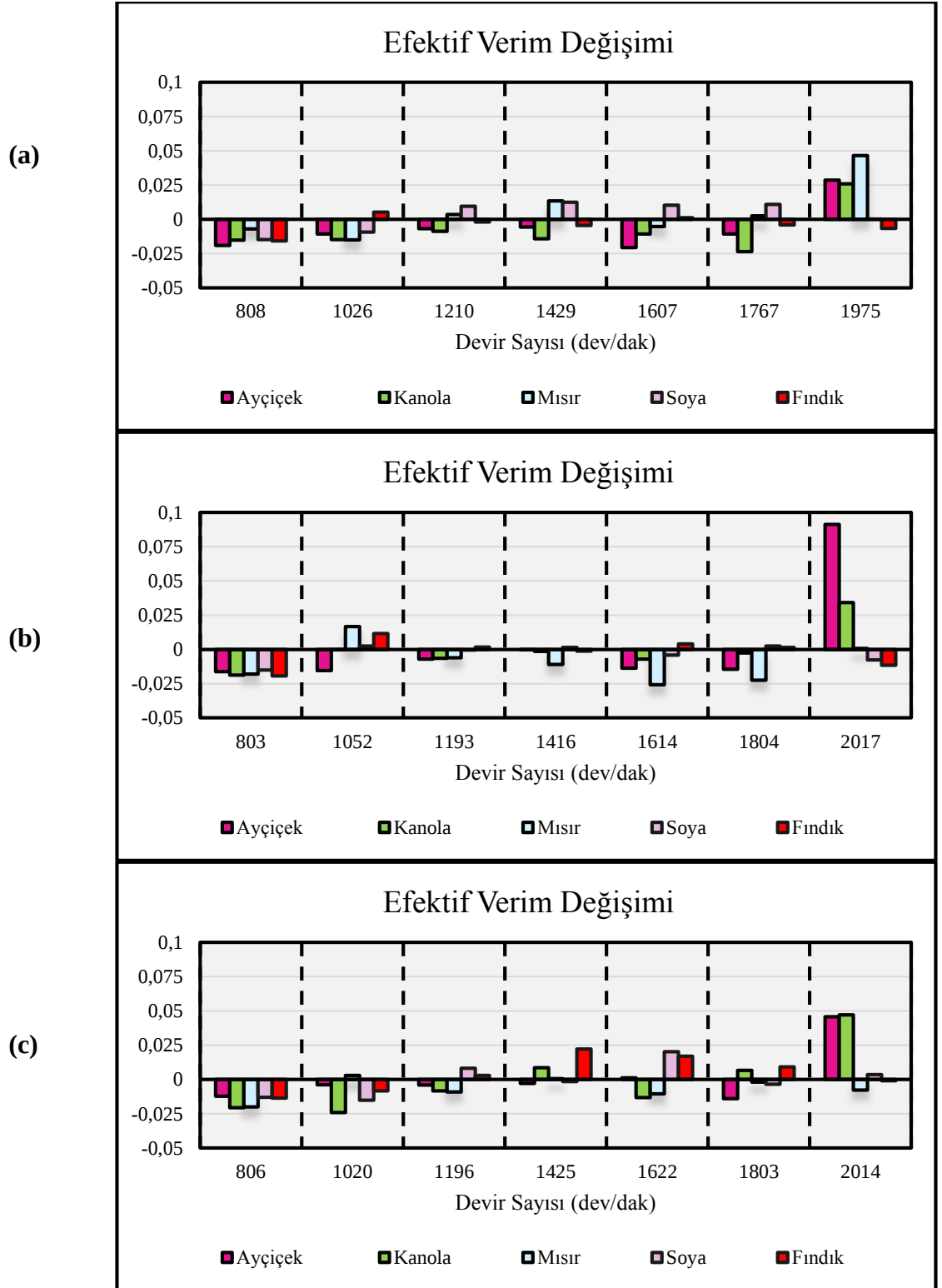


(c)



Şekil 4.11. Yakıtlara ait efektif verim değerleri

* (a)B20 karışımı (b)B50 karışımı (c)B100 yakıtı



Şekil 4.12. Efektif verim değerlerindeki değişim miktarları

* (a)B20 karışımı (b)B50 karışımı (c)B100 yakıtı

4.3. Egzoz Emisyonları

Egzoz emisyon değerleri iki farklı şekilde incelenmiştir.

1. DY, B20, B50 ve B100 yakıtları kullanılması durumunda oluşan emisyon değerleri (CO, CO₂, NO, HC ve duman) karşılaştırılmıştır.
2. Biyodizel kullanılması durumundaki etkinin daha belirgin olarak gözlemlenebilmesi için; B20, B50 ve B100 yakıtlarının kullanılması durumundaki emisyon değerlerinin dizel yakıt kullanılması durumundaki değerlerine göre yüzdesel değişimleri grafiksel olarak incelenmiştir.

CO emisyonu: Yanma ortamında yeterli miktarda oksijen bulunmadığı durumlarda yakıtın yanma işlemi tam olarak tamamlanamaz ve yakıtın yapısındaki karbon, ortamda az miktarda bulunan oksijen ile birleşerek CO oluşturur. Biyodizel yaklaşık %10 oksijen içeren oksijenleştirilmiş bir yakıt olduğu için yanma verimi dizel yakıta göre daha iyidir ve bu nedenle dizel yakıta oranla daha az miktarda CO emisyonu oluşturur.

1. Yapılan deneyler neticesinde elde edilen CO emisyon miktarları Şekil 4.13’de görülmektedir. Grafik incelendiğinde;

- Genel olarak biyodizel numunelerine ait CO emisyon değerlerinin dizel yakıtinkine paralel olduğu ve devir sayısının artmasıyla azaldığı görülmektedir. Dizel yakıtın CO emisyon değerleri 0.18 ppm’den 0.06 ppm değerine kademeli olarak azalırken, benzer şekilde B20 MME de 0.20 ppm’den 0.08 ppm’e, B50 AME de 0.23 ppm’den 0.09 ppm’e ve B100 SYM de 0.28 ppm’den 0.08 ppm’e azalma göstermektedir.
- Karışımdaki biyodizel oranı arttıkça CO emisyon miktarları da artmaktadır. Örneğin; SME için 1600 dev/dak devir sayısında B20’de 0.086 ppm, B50’de 0.105 ppm ve B100’de 0.108 ppm’dir. Benzer şekilde 2000 dev/dak devir sayısında AME için bu değerler sırasıyla 0.0925-0.0995-0.1045 ppm şeklinde artmaktadır.

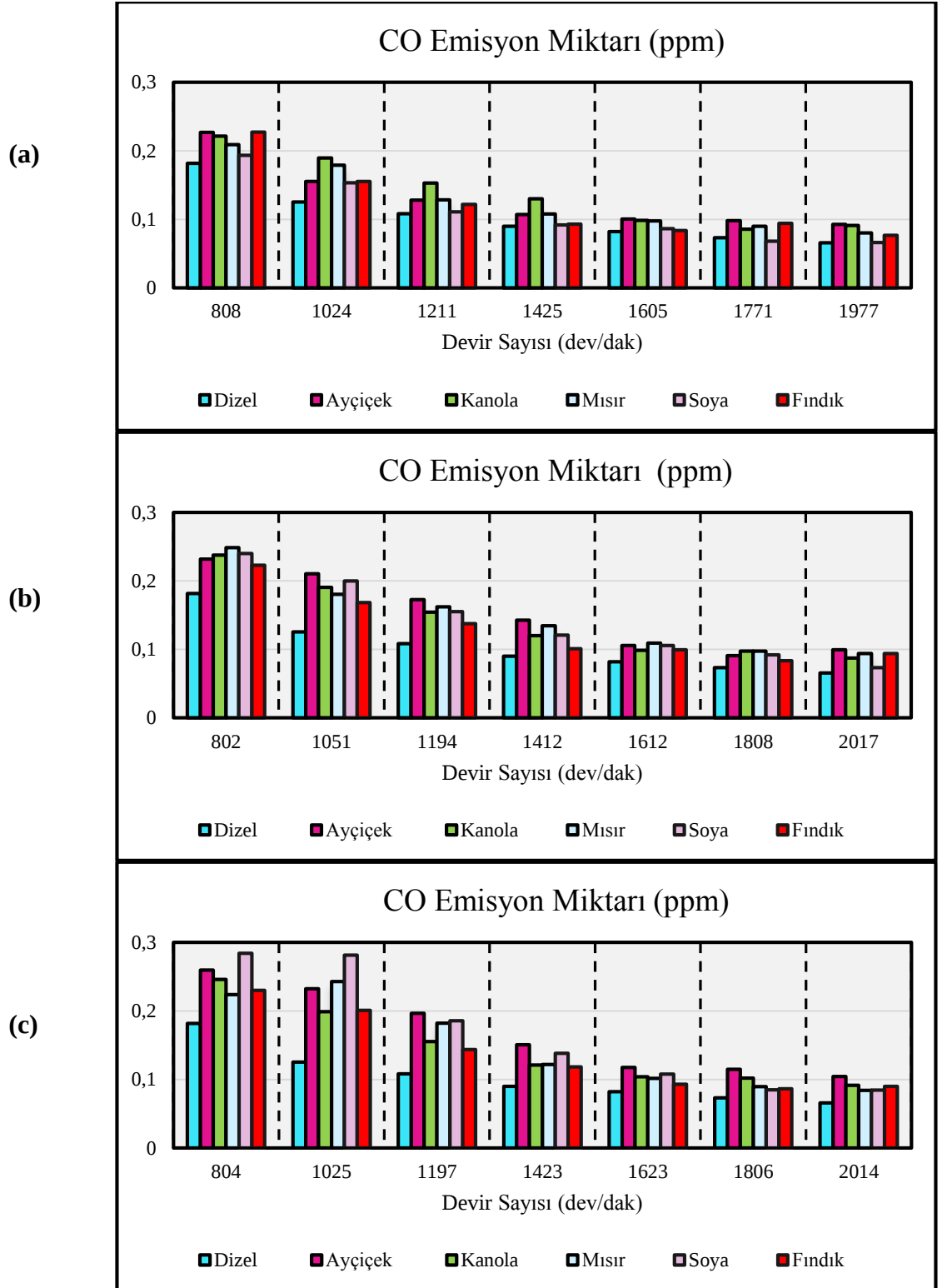
Biyodizel numunelerine ait CO emisyonlarının devir sayısı ile nasıl değiştiğini, biyodizel numunelerinin birbirlerine göre değişimini ve bu numunelerin dizel yakıt ile arasındaki

ilişkiyi incelemek amacıyla hazırlanan Şekil 4.14’de, numunelere ait CO emisyon değerlerinin dizel yakıttaki CO emisyon değerlerine göre değişim miktarları gösterilmektedir. Grafik incelendiğinde;

- Biyodizel kullanılması durumunda dizel yakıtla oranla genellikle CO emisyon miktarında artış görülmektedir. Bu artış miktarı çoğunlukla devir sayısının artmasıyla azalmaktadır. Örneğin; B20 karışımında AME için bu fark değerleri; 0.045 ppm’den 0.026 ppm’e kademeli olarak azalmıştır.
- Karışımdaki biyodizel yüzdesi arttıkça farklarda artmaktadır. B50 karışımdaki AME deki fark değerleri 0.050 ppm’den 0.033 ppm’e ve B100 yakıtındaki fark değerleri 0.077 ppm’den 0.038 ppm’e düşmektedir.

Biyodizel kullanılması sonucunda oluşan CO emisyon değerlerindeki artış miktarlarını etkileyen iki parametre vardır. Birincisi; devir sayısı arttıkça artış miktarlarında azalma olmasıdır. Bu durumun nedeni; devir sayısının artması ile beraber piston hızında artma olması ve silindir içerisinde hava hareketlerinin artarak püskürtülen yakıtın hava içerisinde daha hızlı dağılabilmesidir. Bu şartlarda CO emisyonu azalmakta ve buna karşılık daha iyi yanma performansı sağlanacağı için CO₂ emisyon miktarı artmaktadır. Böylece yüksek viskozite etkisiyle artan CO miktarında azalma olacaktır. İkincisi; karışımdaki biyodizel yüzdesinin artmasıyla CO emisyon farklarının da artmasıdır. Bu durumun nedeni; karışımdaki biyodizel oranının artmasıyla karışımın viskozitesi artması ve yanma odasında düşük atomizasyon nedeniyle yanma performansının azalmasıdır. Sonuçta CO emisyon miktarı artacaktır.

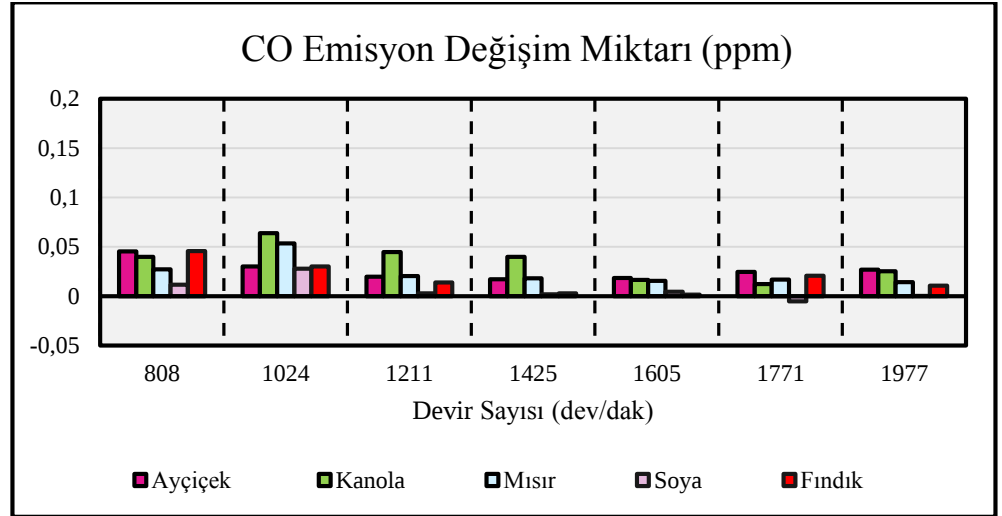
Tüm biyodizel sonuçlar birlikte değerlendirildiğinde; en az CO; 1600 dev/dak devir sayısında B20 karışımındaki FME olduğu görülmektedir. Buna karşın 1000 dev/dak devir sayısında B100 yakıtında SME en fazla CO emisyonu üretir.



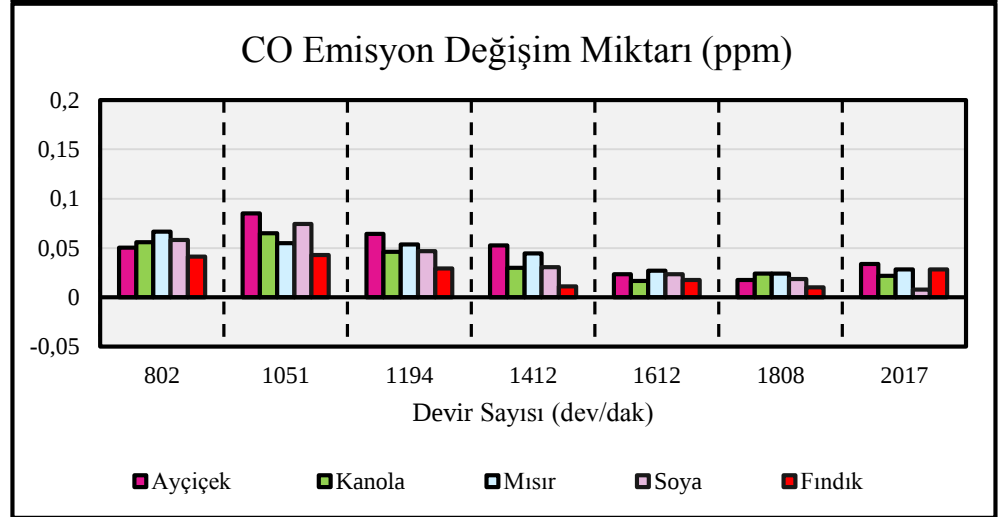
Şekil 4.13. CO emisyon miktarları

* (a)B20 karışımı (b)B50 karışımı (c)B100 yakıtı

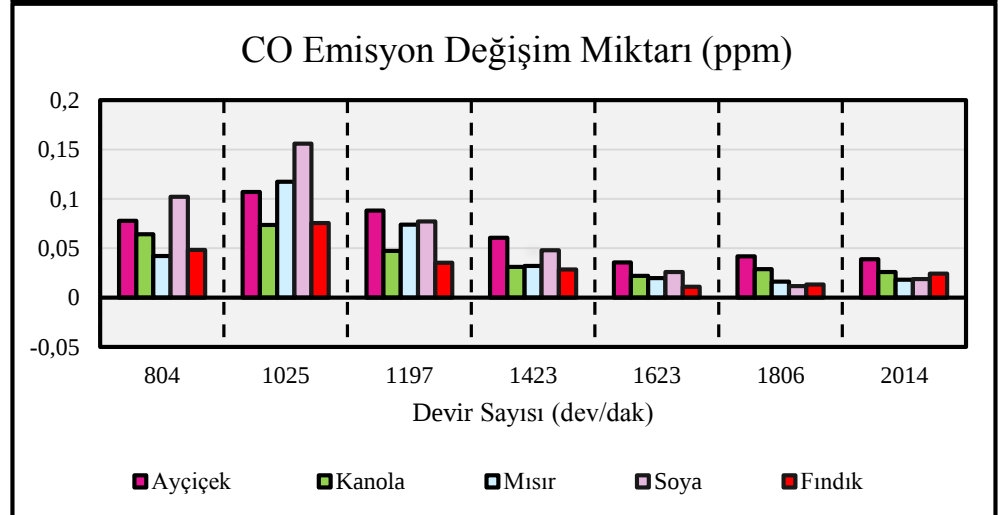
(a)



(b)



(c)



Şekil 4.14. CO emisyon değerlerindeki değişim miktarları.

* (a)B20 karışımı (b)B50 karışımı (c)B100 yakıtı

Literatürde yapılan çalışmaların büyük çoğunluğunda elde edilen sonuçlarda CO emisyon miktarlarında azalma olduğu tespit edilmiş olmasına rağmen bizim çalışmamızda CO emisyon miktarlarının arttığı tespit edilmiştir. Ancak literatürde bu yönde yapılan çalışmalar da rastlamak mümkündür. Abbas and Davis 1990; Altın *et al.* 2001;; Hamasaki *et al.* 2001; Ramadhas *et al.* 2004; Agarwal 2007; Banapurmath and Tewari 2008a; Banapurmatha *et al.* 2008b; Nascimento *et al.* 2008; Fontaras *et al.* 2009; Luján *et al.* 2009; Sahoo *et al.* 2009; Enweremadu and Rutto 2010; Senthil Kumar *et al.* 2010; Xue *et al.* 2011 bunlardan bazılarıdır.

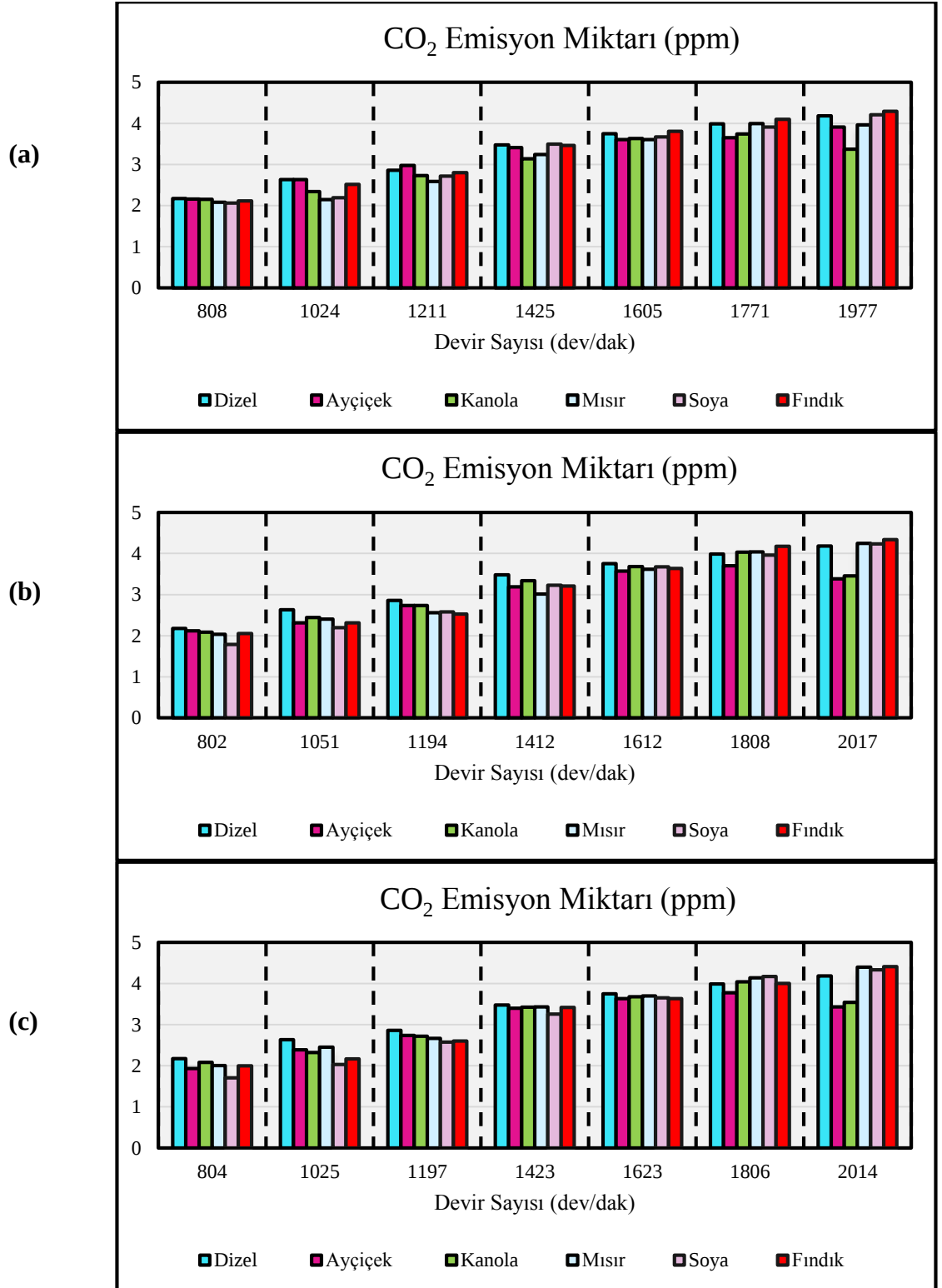
CO₂ emisyonu: CO₂ emisyon değerleri çevre kirliliğinde en etkili emisyon olduğu için içten yanmalı motorlardan salınan CO₂ emisyon miktarının azaltılması da önemli bir husustur. CO₂, yanma çeşitlerinin tamamında oluşan bir gazdır. Ancak bu oluşum miktarı ortamındaki oksijen miktarına göre değişmekte, oksijen miktarının fazla olmasıyla artmaktadır. Biyodizel yapısında oksijen ihtiva eden bir yakıt olduğu için yanma ortamında bulunan oksijen dizel yakıtlara göre daha fazladır ve daha fazla miktarda CO₂ emisyon oluşumuna neden olur. Ancak biyodizelin hammaddesini elde etmek için üretilen yağlı tohum bitkilerinin CO₂ çevrimindeki aktif rolü birlikte düşünüldüğünde, motor egzozundan salınan daha fazla miktardaki CO₂ emisyonun, bu bitkiler tarafından oksijene dönüştürüldüğü ve böylece CO₂ emisyon miktarının biyodizel kullanımı ile azaldığı kabul edilmektedir.

Yapılan deneysel çalışmamız sonucunda elde edilen CO₂ emisyon miktarları Şekil 4.15’de gösterilmektedir. Değerler incelendiği zaman,

- Tüm yakıtlarda devir sayısının artmasıyla birlikte genellikle CO₂ emisyon miktarında da artış görülmektedir. B20 karışımında dizel yakıt 2.175 ppm’den 4.182 ppm değerine kademeli olarak artarken, benzer şekilde SME de 2.065’den 4.21 ppm değerine ve AME de 2.16 ppm’den 3.91 ppm değerine kademeli olarak artmaktadır. Bu durumun muhtemel nedeni; düşük yüklerde viskozite etkisinin oksijen etkisinden daha baskın olması ve tam tersi şekilde yüksek yüklerde oksijen etkisinin viskozite etkisinden daha büyük olmasıdır. Devir sayısı artınca ortamdaki oksijenin etkisiyle yanma kalitesi artacak ve CO₂ emisyon miktarı da artacaktır.

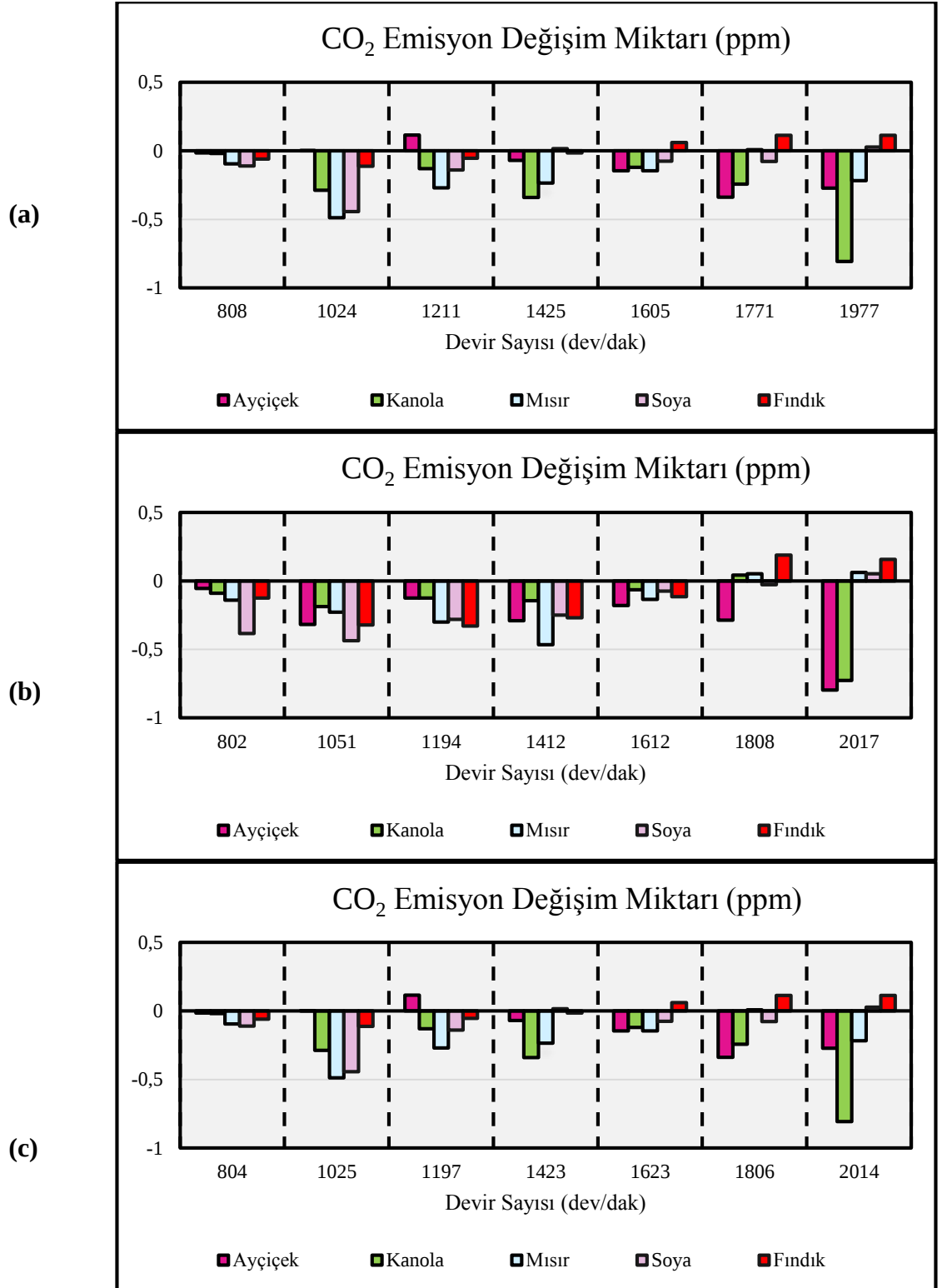
- Karışımdaki biyodizel yüzdesi ile ilgili net bir durum söz konusu değildir. Örneğin 1200 dev/dak devir sayısındaki B20 karışımdaki numunelerin ortalama değerleri 2.78 iken B50'de 2.70 ve B100'de 2.69 şeklinde azalmakta diğer taraftan 1800 dev/dak devir sayısında bu ortalama değerler sırasıyla 3.92-3.99-4.03 şeklinde artmaktadır.
- Biyodizel numunelerine ait CO₂ emisyon değerlerinin devir sayısı ile nasıl değiştiğini, biyodizel numunelerinin birbirlerine göre değişimini ve bu numunelerin dizel yakıt ile arasındaki ilişkiyi incelemek amacıyla hazırlanan Şekil 4.16'da, numunelere ait CO₂ emisyon değerlerinin dizel yakıtın CO₂ emisyon değerlerine göre fark değerleri gösterilmektedir. Grafik incelendiğinde;
- Biyodizel kullanılması durumunda üretilen CO₂ emisyon değerlerinin genel olarak dizel yakıttan düşük olduğu görülmektedir. Yakıtların ortalama azalma değerleri incelendiğinde; B20 yakıtında AME'nin CO₂ emisyon miktarı, dizel yakıtı oranla %2.5, KME %7.8, MME %6.9, SME %4.2 ve FME %0.3 azaldığı, benzer şekilde B50 karışımı için sırasıyla %8.3-1.8-5.7-7.5-4.6 ve B100 yakıtı için %7.7-1.4-2.2-7.9-4.9 azaldığı görülmektedir.
- Biyodizel karışım yüzde miktarı ile CO₂ emisyonu arasında direk bir ilişki bulunmamakla birlikte, özellikle 2000 dev/dak devir sayısında CO₂ emisyon farkının belirgin bir şekilde arttığı ve her üç karışım oranında da en az farkın 1600 dev/dak devir sayısında olduğu görülmektedir.

Tüm biyodizel sonuçlar birlikte değerlendirildiğinde (yüzdesel farklılıklara bakılarak); en az CO₂ üretimi 2000 dev/dak devir sayısında B50 karışımındaki AME'dir. Buna karşın 1800 dev/dak devir sayısında B50 karışımında FME en fazla CO₂ emisyonu üretir.



Şekil 4.15. CO₂ emisyon miktarları

* (a)B20 karışımı (b)B50 karışımı (c)B100 yakıtı



Şekil 4.16. CO₂ emisyonları değerlerindeki değişim miktarları

* (a)B20 karışımı (b)B50 karışımı (c)B100 yakıtı

Oluşan CO₂ miktarının azalması yanmanın daha kaliteli olduğu göstermektedir. Bu durum biyodizelin yakıt yoğunluğunun yüksek olması ile açıklanabilir. Ayrıca biyodizel, oksijenleştirilmiş bir yakıt olduğu için daha düşük oranda karbon ve hidrojen ihtiva eder. Bu nedenle oluşan CO₂ miktarı, dizel yakıttan daha azdır. Yapılan çalışmalarda; Altın *et al.* 2001; Lin *et al.* 2006; Lin and Lin 2007b; Sahoo *et al.* 2007; Keskin *et al.* 2008; Fontaras *et al.* 2009; Ozsezen *et al.* 2009; Xue *et al.* 2011 benzer sonuçlar ile karşılaşmak mümkündür.

NO_x emisyonu: Azot oksitler, kükürt oksitlerle birlikte asit yağmurlarına sebep oldukları için salınımının azaltılması istenilen bir emisyonudur. İçten yanmalı motorlarda oluşan NO_x emisyonu iki temel nedeni vardır. Birincisi ortamda bulunan aşırı miktardaki oksijen diğeri ise yanma ortamının yüksek ısıdır. Dizel motorlar benzinli motorlara göre daha yüksek sıkıştırma oranlarında çalıştıkları için daha yüksek yanma sıcaklıkları oluşur ve bu nedenle NO_x emisyonları her zaman daha yüksektir. Dizel motorlarda yakıt olarak biyodizel kullanılması ortamdaki oksijen yoğunluğunu artıracığı için yanma sonucu oluşan NO_x emisyon miktarı da artacaktır.

Yapılan deneysel çalışma sonucunda elde edilen NO emisyon değerleri Şekil 4.17’de görülmektedir. Grafik incelendiğinde;

- Bütün biyodizel yakıtlara ait NO emisyonlarının dizel yakıtı paralel bir şekilde, devir sayısının artmasıyla genel olarak arttığı görülmektedir. Örneğin; dizel yakıt 117 ppm’den 667 ppm değerine kademeli artarken benzer şekilde B20 karışımında AME 111 ppm’den 521 ppm’e; B50 karışımında MME 76 ppm’den 573 ppm’e; B100 yakıtı SME 25 ppm’den 622 ppm değerine değişmektedir.
- Karışımındaki biyodizel yüzdesi arttıkça NO emisyon değeri de genel olarak azalmaktadır. Örneğin 1600 dev/dak değerindeki FME’ne ait NO emisyon değeri B20 karışımında 486 ppm, B50 karışımında 448 ppm ve B100 yakıtı 396 ppm değerindedir.

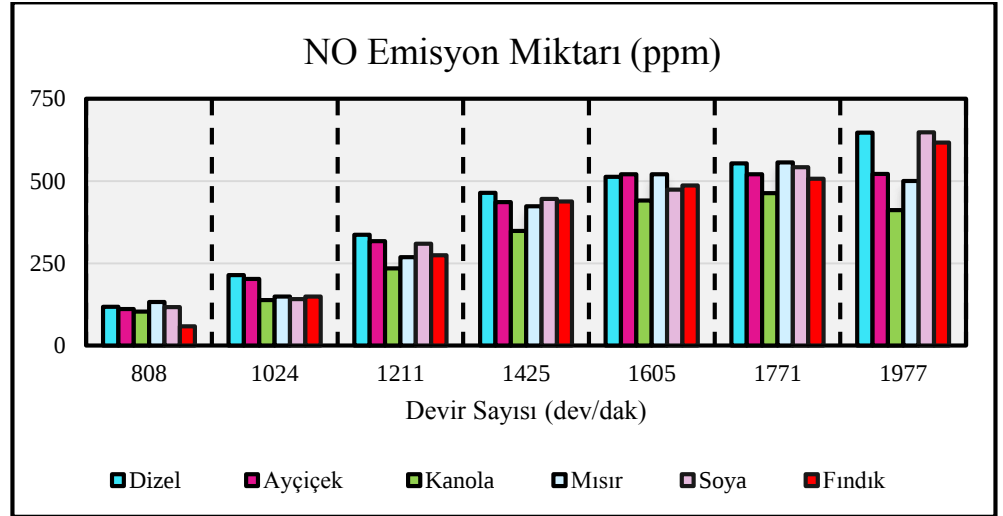
Biyodizel numunelerine ait NO emisyon değerlerinin devir sayısı ile nasıl değiştiğini, biyodizel numunelerinin birbirlerine göre değişimini ve bu numunelerin dizel yakıt ile arasındaki ilişkiyi incelemek amacıyla hazırlanan Şekil 4.18’de, numunelere ait NO

emisy on değ erlerinin diz el yak ıt ın NO emisy on değ erlerine g ö re fark ı g ö sterilmektedir. Grafik incelendiğ inde;

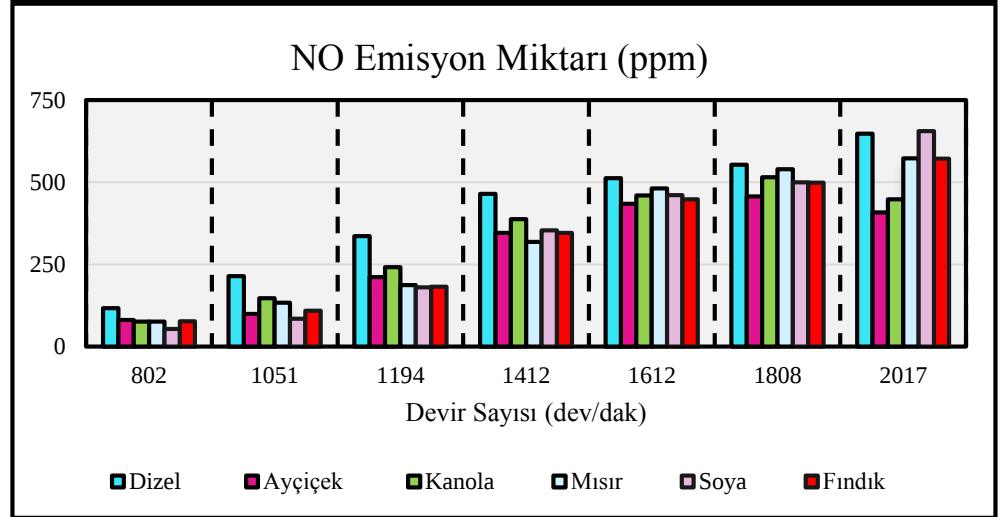
- Biyodiz el kullan ıl mas ı dur um unda ü retil en NO emisy on değ erlerinin gen el olarak diz el yak ıt ı t an d ü ş ü k oldu ğ u g ö r ü l m e k t e d i r .
- Azalma miktar ı kar ı ş ı m daki biyodiz el yüz desi art t ık ç a art m a k t a d ır . Ö r n e ğ in; 1200 dev/dak devir say ısı iç in MME'ne ait NO emisy on değ iş im miktar ı B20 yak ıt ında %30 iken, B50'de %80 ve B100'de %88'dir.
- Azalma miktar ı ile devir say ısı aras ındak i iliş ki net olmamakla birlikte, öz ellikle B50 ve B100 yak ıt ında 800-1200 dev/dak devir aral ı ğ ında artma oldu ğ u, 1200-1800 dev/dak devir aral ı ğ ında azalma oldu ğ u ve 1800-2000 dev/dak devir aral ı ğ ında tekrar artma oldu ğ u g ö r ü l m e k t e d i r .

NO_x emisy onu; oksijen bileş eni, adyabatik alev sıcaklı ğ ı ve spre y öz elliklerine duyarlıdır. Biyodiz el, s ü l f ü r ve aromatikler iç ermediğ i iç in nitrojen bileş enleri çok kü ç ü k t ü r . Spre y karakterstikleri; damla boyutuna, damla momentine, hava ile kar ı ş ı m derecesine ve penetrasyon oranına ba ğ l ı d ır . Bu öz elliklerin herhangi birindeki değ iş im NO_x üretimini değ iş tirebilir. Alev b ö l g e s i n d e k i yak ıt ın kimyasal etkisi, NO_x üretimindeki değ iş imden sorumludur. Bunların tamam ı diz el motorlarda NO_x azalması nın se b e l e r i d i r (Enweremadu and Rutto 2010).

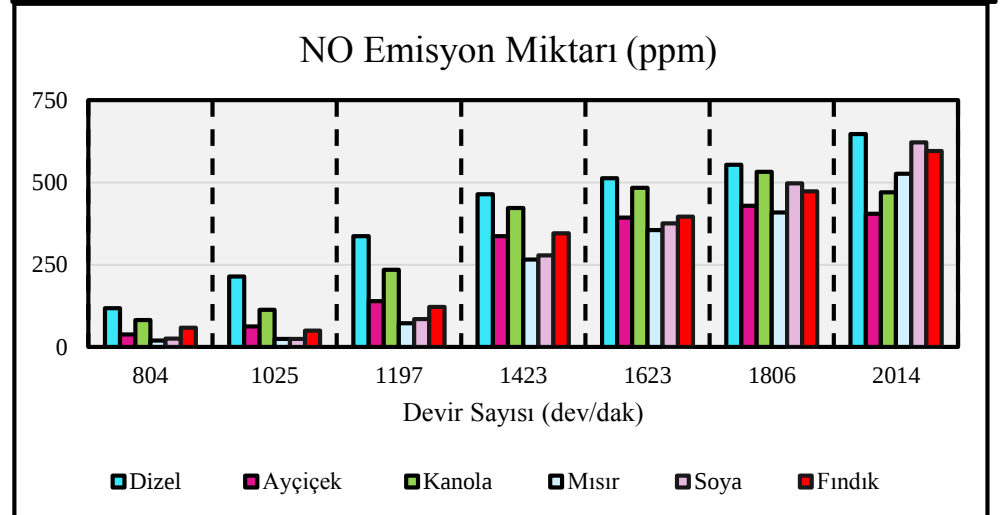
(a)



(b)

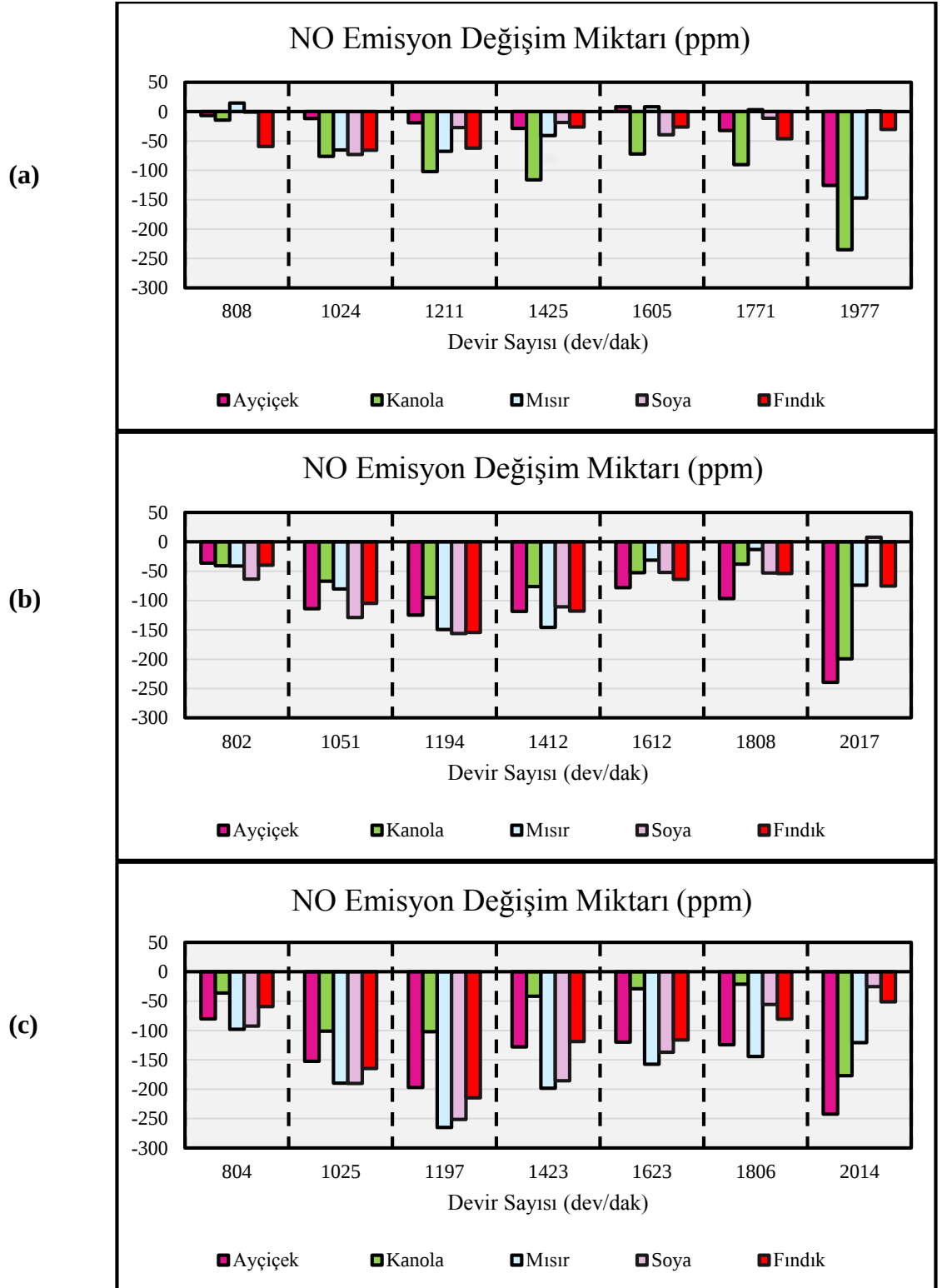


(c)



Şekil 4.17. NO emisyon miktarları

* (a)B20 karışımı (b)B50 karışımı (c)B100 yakıtı



Şekil 4.18. NO emisyonları değerlerindeki değişim miktarları

* (a)B20 karışımı (b)B50 karışımı (c)B100 yakıtı

Benzer sonuçlar; Peterson and Reece 1996; Graboski and McCormick 1998; Hamasaki *et al.* 2001; Altın *et al.* 2001; (Prasas and Krishna 2014); Dorado *et al.* 2003; Ramadhas *et al.* 2004; M. Lapuerta *et al.* 2005; Puhan *et al.* 2005; Agarwal 2007; Banapurmatha *et al.* 2008b; Lapuerta *et al.* 2008; Nascimento *et al.* 2008; Utlu and Kocak 2008; Aydin and Bayindir 2010; Enweremadu and Rutto 2010; Xue *et al.* 2011; Yücesu *et al.* 2013 yayınlarında karşılaşmak mümkündür. Tüm biyodizel sonuçlar birlikte değerlendirildiğinde (yüzdesel farklara bakılarak); en az NO üretimi 1200 dev/dak devir sayısında B100 yakıtındaki MME'dir. Buna karşın 800 dev/dak devir sayısında B20 karışımında MME en fazla NO emisyonu üretir.

HC emisyonu: HC emisyon oluşumunda Bölüm 2.1.3.3'de bahsedildiği gibi birçok sebep bulunmaktadır. Ancak bilinen en belirgin neden tüketilen yakıt miktarıdır. Biyodizel kullanımında yakıt tüketiminin belirgin bir şekilde arttığı Bölüm 4.2'de anlatılmıştı. Bu nedenle biyodizel kullanımı ile genel olarak HC emisyonu artmaktadır.

Yapılan çalışma sonucunda elde edilen HC emisyon değerleri Şekil 4.19'da görülmektedir. Grafik incelendiğinde; dizel yakıtın HC emisyon değerinin devir sayısı ile fazla değişmediği görülmektedir. Fakat biyodizel numuneleri ile devir sayısı ve karışımdaki biyodizel yüzde değişiminde arasında tanımlanması zor bir ilişki vardır.

Biyodizel numunelerinin birbirlerine göre değişimini ve bu numunelerin dizel yakıt ile arasındaki ilişkiyi daha net görebilmek amacıyla Şekil 4.20 hazırlanmıştır. Grafik incelendiğinde; numunelere ait HC emisyon değerleri ile dizel yakıtı ait HC emisyon değerleri arasındaki fark görülmektedir. Bu grafiğe göre;

- Biyodizel kullanılması durumunda genel olarak HC emisyon miktarlarının arttığı görülmektedir. Örneğin 1000 dev/dak devir sayısı için KME'ne ait artış oranları incelendiğinde bu oranların B20 de %61, B50'de %97 ve B100'de %116 olduğu görülmektedir. Benzer şekilde 2000 dev/dak devir sayısındaki MME için değerler sırasıyla %88-79-78'dir. Fakat özellikle B50 karışımına sahip FME'nin HC emisyon değişimi incelendiği zaman; HC emisyonunun azaldığı ve devir sayısının artmasıyla birlikte azalma miktarında da artış olduğu görülmektedir.

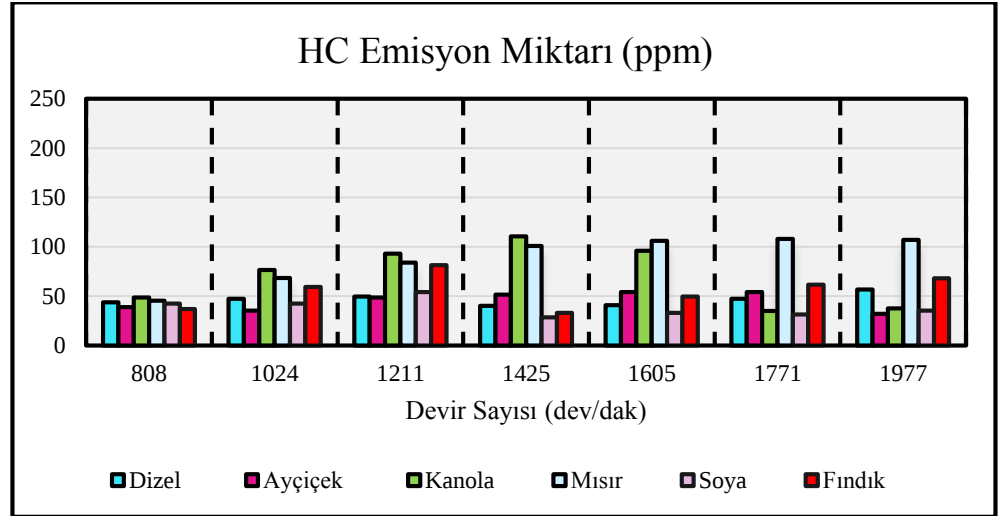
- Karışımdaki biyodizel oranı arttıkça genel olarak HC emisyon miktarı artmaktadır. Bu durum özellikle B100 yakıtında aşikârdır. 1400 dev/dak devir sayısı için SME incelendiği zaman B20 karışımında %19 azalma, B50 de herhangi bir değişiklik yokken (%0), B100 de bu değer %34 artma şeklindedir. Bu durumu; yakıtın düşük ısı enerjisi ile açıklamak mümkündür. Yakıtın ısı enerjisi kapasitesi düşük olduğu için yakıt tüketim miktarı fazladır. Yakıtın fazla tüketilmesi de HC miktarını artırmaktadır.

HC emisyon miktarındaki artış, CO emisyon miktarındaki artışın nedeniyle de ilişkilendirilebilir. Yakıtın yüksek viskozitesi ve düşük uçuculuk özelliği, yanma odasında düşük atomizasyona ve elverişsiz yanmaya neden olacaktır. Bu durum da HC emisyon miktarını artırmaktadır.

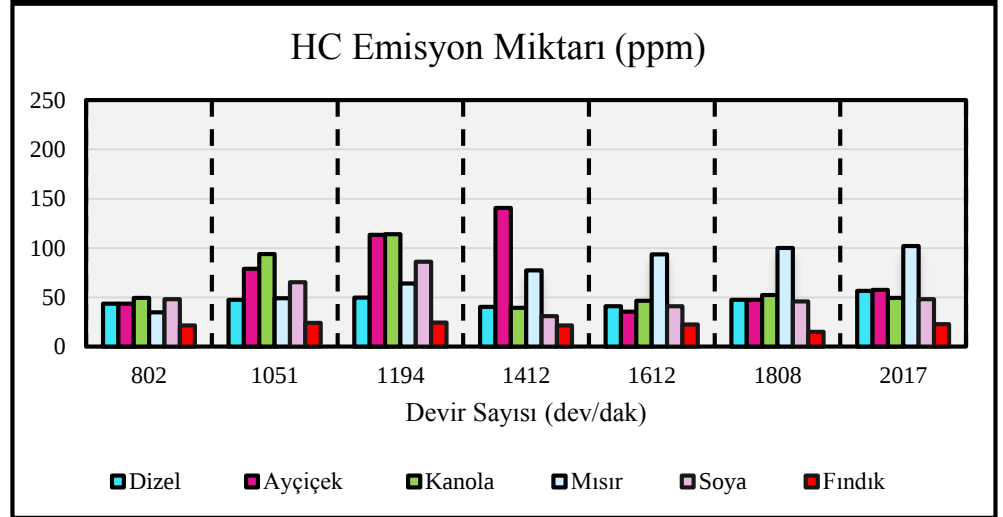
Benzer çalışmalar; Abbas and Davis 1990; Altın *et al.* 2001; Ramadhas *et al.* 2004; Banapurmatha *et al.* 2008b; Fontaras *et al.* 2009; Sahoo *et al.* 2009; Senthil Kumar *et al.* 2010; Xue *et al.* 2011 görmek mümkündür.

Tüm biyodizel sonuçlar birlikte değerlendirildiğinde (yüzdesel farklara bakılarak); en az HC üretiminin 2000 dev/dak devir sayısında B50 karışımındaki FME'dir. Buna karşın 2000 dev/dak devir sayısında B100 yakıtında AME en fazla HC emisyonu üretir.

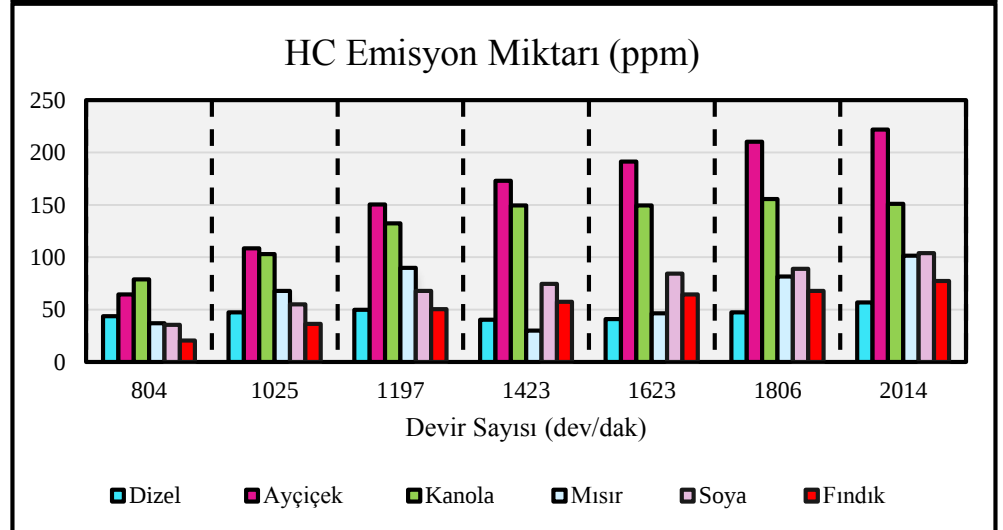
(a)



(b)

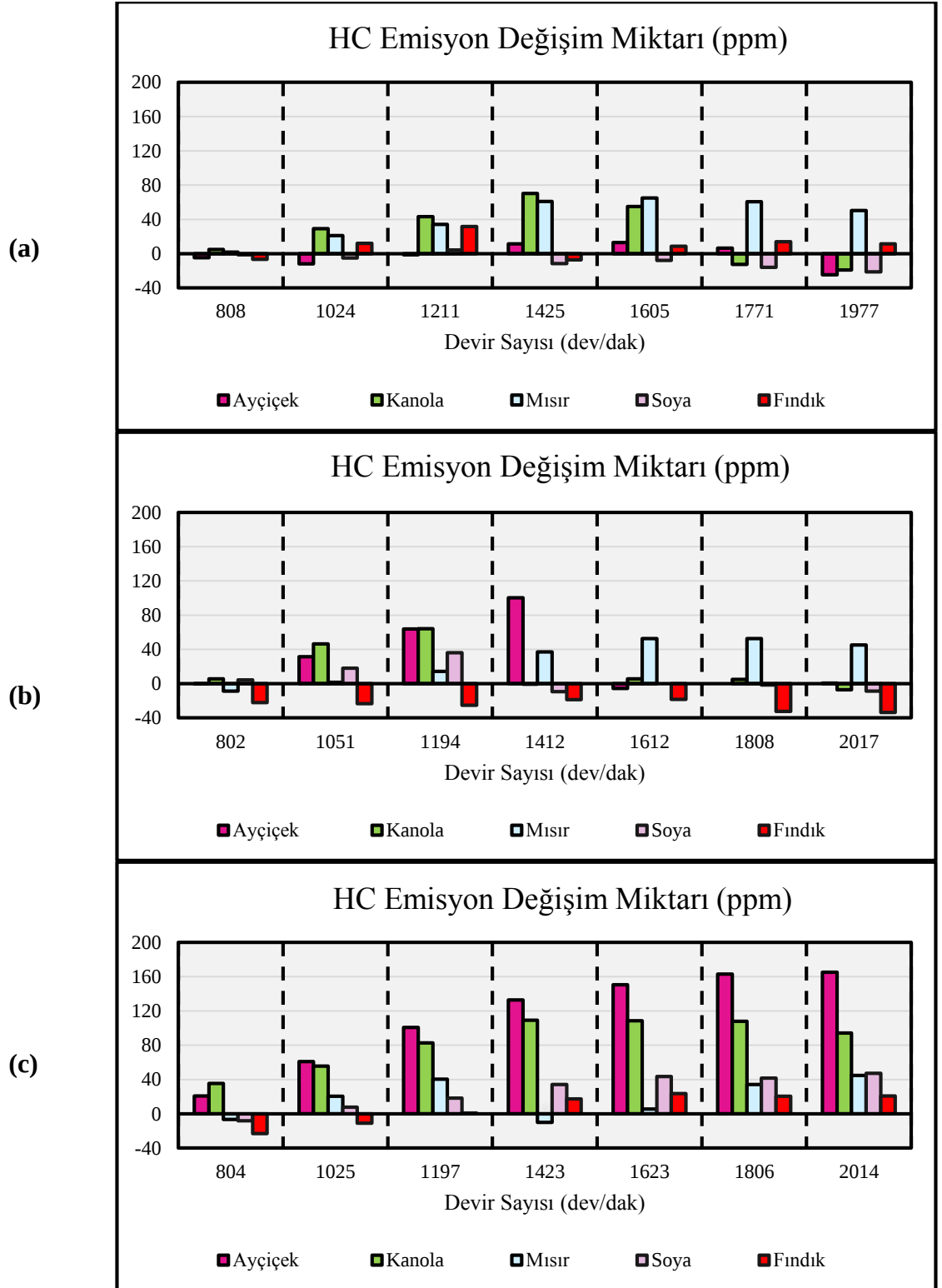


(c)



Şekil 4.19. HC emisyon miktarları

* (a)B20 karışımı (b)B50 karışımı (c)B100 yakıtı



Şekil 4.20. HC emisyon değerlerindeki değişim miktarları

* (a)B20 karışımı (b)B50 karışımı (c)B100 yakıtı

Duman miktarı: Duman yoğunluğu; yakıttaki oksijen miktarı kadar, giren havanın miktarına, yakıttaki hidrokarbonların yapısına ve bileşenlerine bağlıdır. Yani yanma kalitesi duman oluşumunda etkilidir. Biyodizel yakıtlar normal dizel yakıtlara göre daha fazla miktarda oksijen içerdikleri için daha kaliteli yanmaya sahiptirler ve daha az miktarda duman oluşumuna neden olurlar.

Yapılan deneyler sonucunda tespit edilen duman miktarları Şekil 4.21’de görülmektedir. Grafik incelendiğinde;

- Tüm yakıtların duman miktarlarının devir sayısı ile arttığı görülmektedir. Örneğin; dizel yakıtın duman miktarı 12 ppm’den 57 ppm değerine kademeli bir şekilde artarken benzer şekilde, B20 karışımında SME 6 ppm’den 50 ppm’e B50 karışımındaki FME 13 ppm’den 59 ppm’e ve B100 yakıtındaki MME 15 ppm’den 73 ppm’e kademeli bir şekilde artmaktadır.
- Karışımındaki biyodizel yüzdesi arttıkça duman miktarları artmaktadır. Örneğin FME’ne ait değerleri inceleyelim. Bu değerler B20’de 6 ppm, B50’de 14 ppm ve B100 de 15 ppm olarak artmaktadır.

Biyodizel numunelerinin birbirlerine göre değişimini ve bu numunelerin dizel yakıt ile arasındaki ilişkiyi incelemek amacıyla hazırlanan Şekil 4.22’de; numunelere ait duman miktarı ile dizel yakıtı ait duman miktarı arasındaki fark incelenmiştir. Bu grafiğe göre;

- Biyodizel yüzdesi arttıkça duman miktarı da artmaktadır. B20 karışımlı biyodizel kullanımı duman miktarını azaltırken, B50 oranındaki karışım duman miktarı üzerinde etkisi büyük değildir. Diğer taraftan B100 kullanımı ile duman miktarında büyük artışlar görülmektedir. Örneğin 1600 dev/dak devir sayısındaki MME B20 karışımında %21 azalma, B50 karışımında %2 azalma ve B100 durumunda %44 artma göstermektedir.
- Tüm karışımlarda en büyük değer 1400 dev/dak değerinde elde edilmiştir. Yani fark değerleri 1400 dev/dak devir sayısına kadar artmış, sonra azalmıştır.

Duman yoğunluğu, yakıttaki oksijen miktarı kadar silindirdeki hava miktarına da bağlıdır. Yakıt tüketiminin bir motordaki duman miktarını etkilediği aşıkardır. Özellikle yakıtın

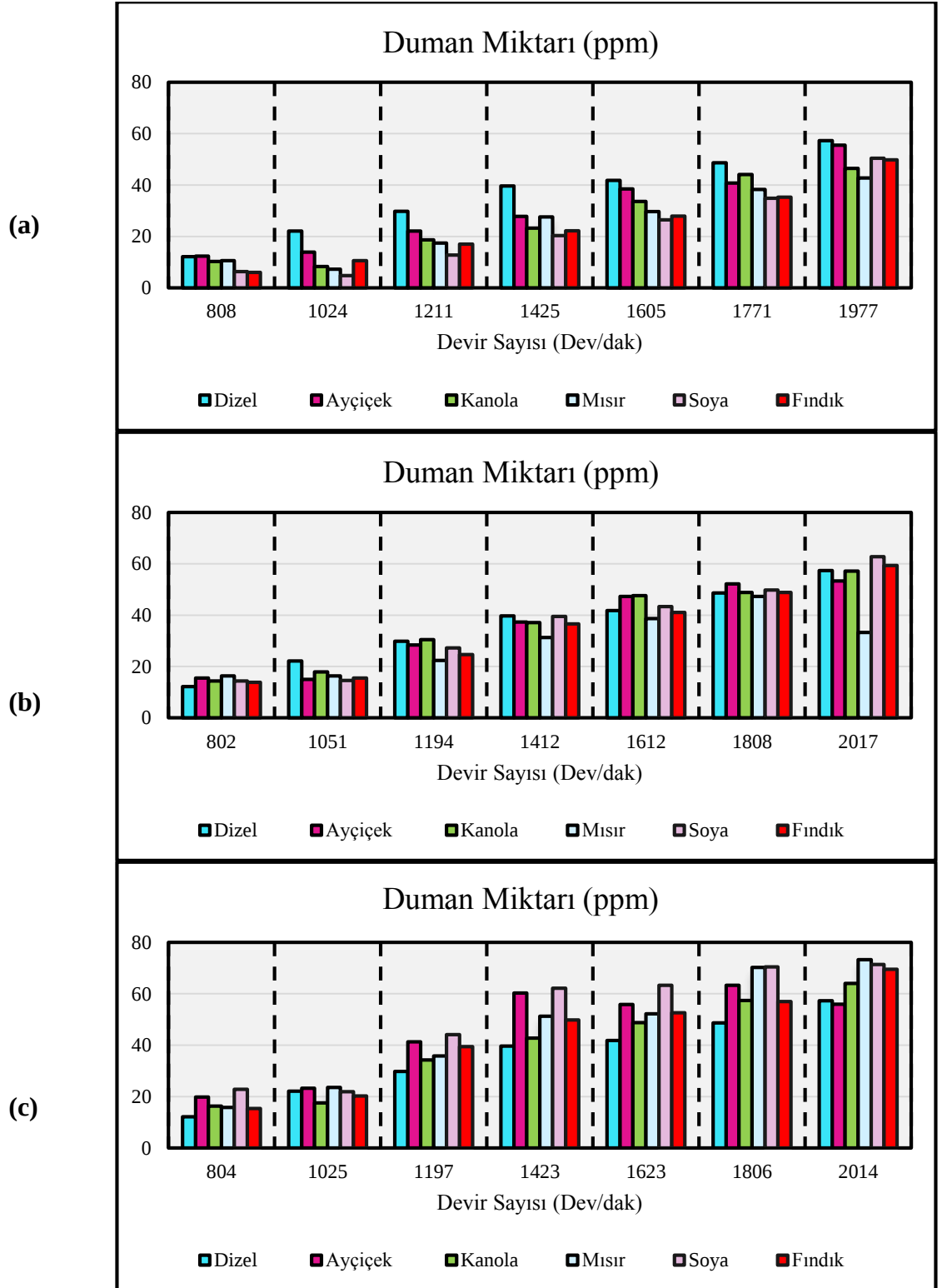
sülfür bileşeni duman formatını etkilerken, oksijen bileşeni de yakıtın oksidasyonu etkiler (Enweremadu and Rutto 2010).

Devir sayısı arttıkça daha fazla miktarda duman oluşmaktadır. Buda devir sayısının artmasıyla yakıtın ön karışım için ayrılan sürenin azaldığı ve yanma kalitesinin düştüğü, bunun sonucunda duman oluştuğu anlamına gelir.

Karışımındaki biyodizel yüzdesi arttıkça duman oluşum miktarı artmaktadır. Bu durumun nedeni; biyodizelin yüksek viskozitesidir. Yakıt hava içerisinde iyi atomize olamadığı için yanma kalitesi düşer ve duman miktarı artar.

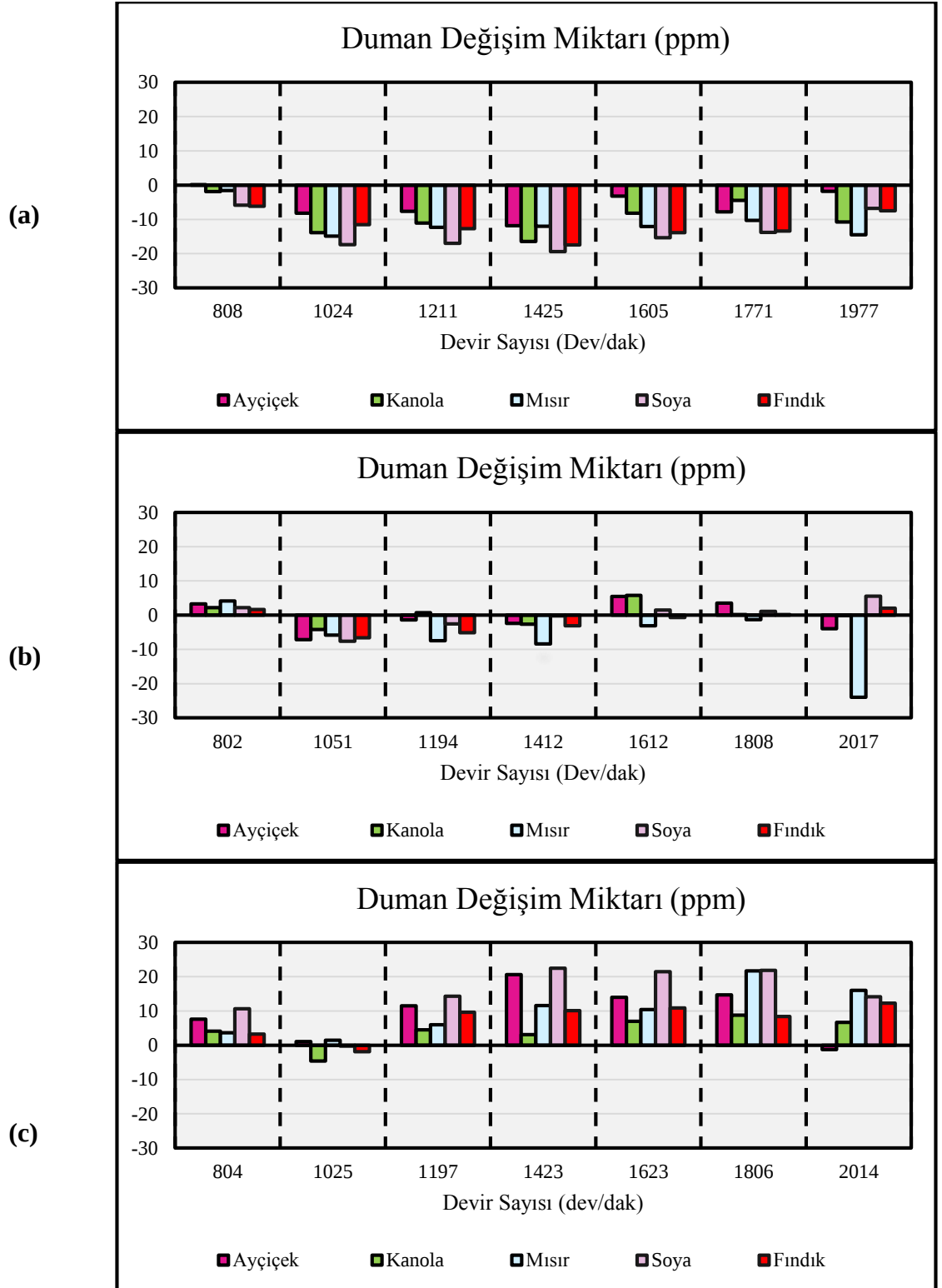
Tüm biyodizel sonuçlar birlikte değerlendirildiğinde (yüzdesel farklara bakılarak); en az duman üretimi 1400 dev/dak devir sayısında B20 karışımındaki SME'dir. Buna karşın 1400 dev/dak devir sayısında B100 yakıtında SME en fazla duman üretir.

Benzer oranları; Abbas and Davis 1990; Agarwal 2007; Fontaras *et al.* 2009; Enweremadu and Rutto 2010; Altın *et al.* 2001; (Prasas and Krishna 2014); çalışmalarında görmek mümkündür.



Şekil 4.21. Duman miktarları

* (a)B20 karışımı (b)B50 karışımı (c)B100 yakıtı



Şekil 4.22. Duman değerlerindeki değişim miktarları

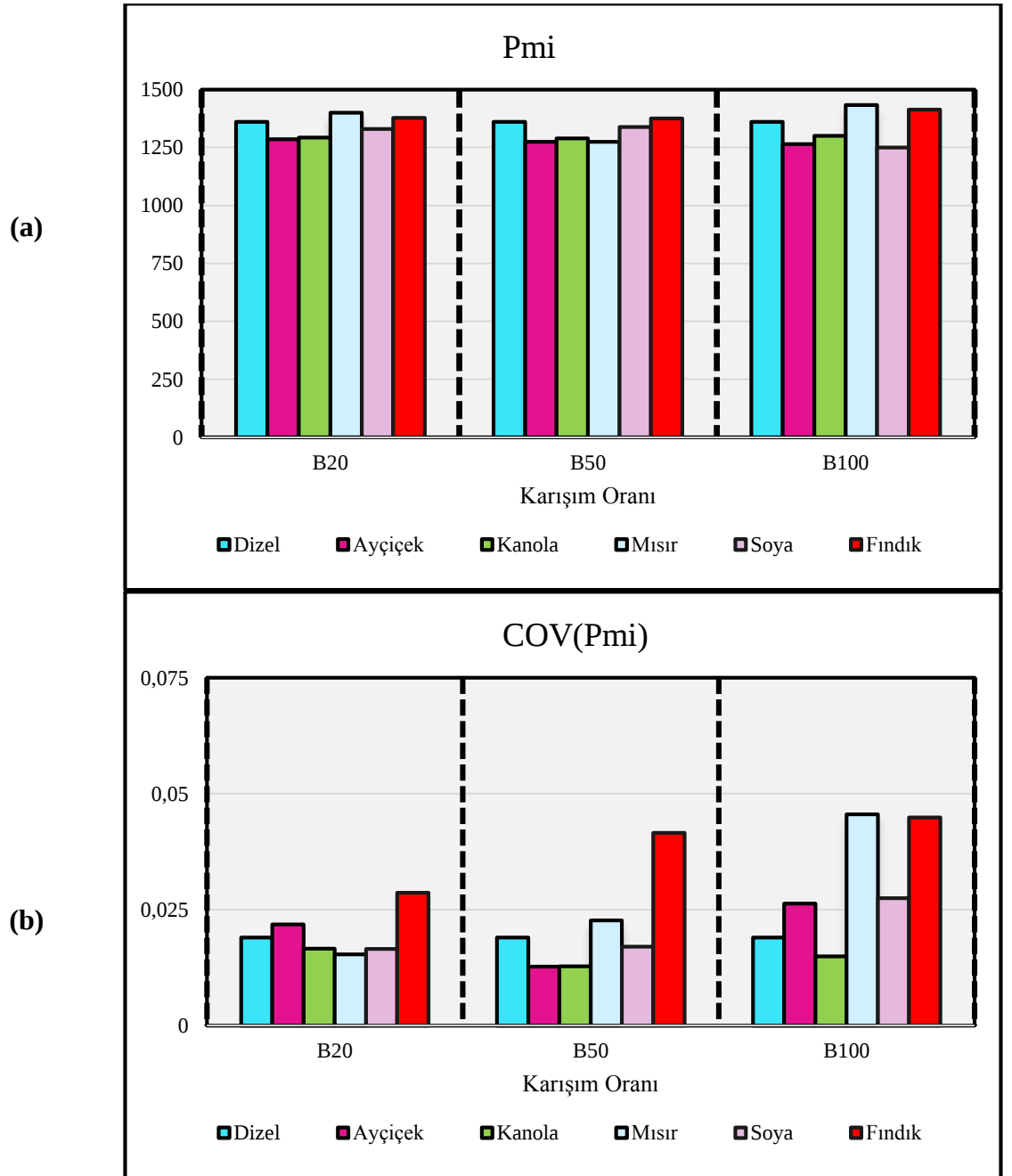
* (a)B20 karışımı (b)B50 karışımı (c)B100 yakıtı

4.4. Çevrimsel Basınç Farklarının COV Analizi ile İncelenmesi

Şekil 4.7-Şekil 4.10 arasında incelenen efektif karakteristiklere ait indike motor karakteristikleri incelenmiştir. Efektif karakteristiklerde daha kararlı bir değişim gösteren 1400 dev/dak ve 2000 dev/dak devir sayıları ele alınmıştır.

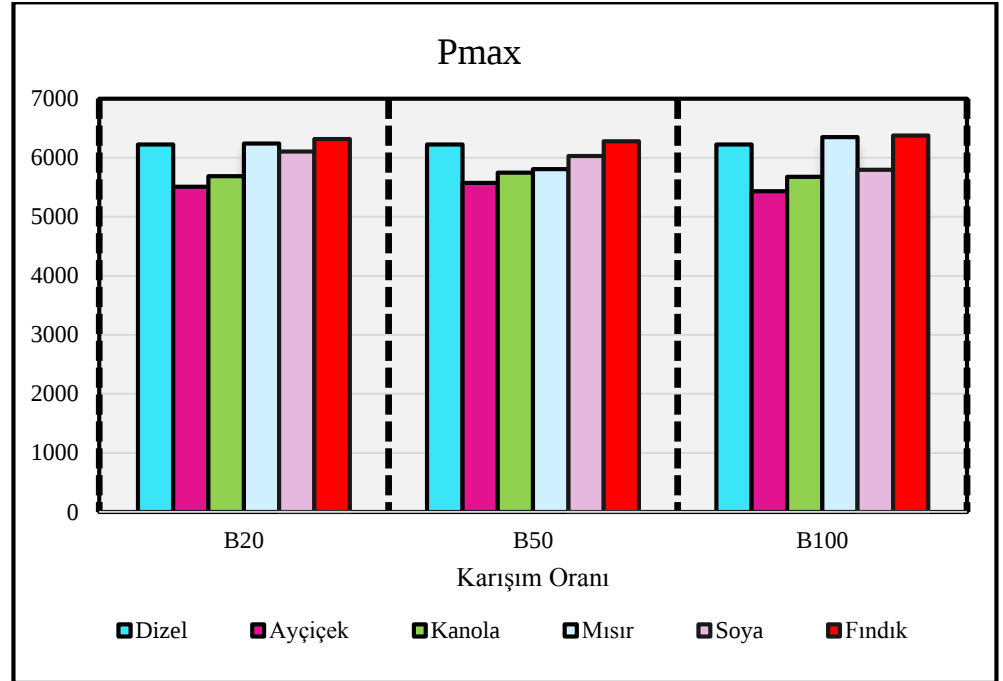
Şekil 4.23’de, 2000 d/dak devir sayısında tespit edilen indike karakteristikler gösterilmektedir. Her bir deney esnasında alınan 1024 ardışık silindir içi basınç ve krank mili açısı verisi analiz edilerek ilgili sonuçlar hesaplanmıştır. Şekil 4.23(a)’da indike ortalama efektif basınç verileri, 4.23(b)’de indike ortalama efektif basınç verilerin kovaryansı, 4.23(c)’de her bir çevrimde görülen maksimum basınç değerlerini, 4.23(d)’de her bir çevrimde görülen maksimum basınç değerlerinin kovaryansını 4.24(e)’de her bir çevrimde görülen maksimum basınç değerlerinin görüldüğü krank mili açısı değerleri bulunmaktadır. Şekil 4.23-a ile verilen indike ortalama efektif basınç verileri incelendiğinde ayçiçek, kanola ve soya yağlarından üretilen biyodizel numuneleri ile yapılan deneylerde saf dizel ile yapılan çalışmalara göre yaklaşık %6’lık bir azalma olduğu, mısır ve fındık yağlarından üretilen biyodizel numuneleri ile yapılan deneylerde dizel yakıtına çok yakın değerler elde edilmiştir. Şekil 4.23(b) ile verilen indike ortalama efektif basınç verilerin kovaryansı incelendiğinde ise tüm biyodizeller ile yapılan deneylerde yaklaşık olarak dizel yakıtı ile benzer değerler tespit edilmiştir. Ancak özellikle FME ile yapılan deneylerde, yakıt içerisinde biyodizel içeriği arttıkça bu parametrede artış olduğu gözlenmektedir. FME, diğer metil esterleriyle karşılaştırıldığında en yüksek setan sayısına sahip olduğu Şekil 4.24’de görülmektedir. Ayrıca FME’nin yoğunluğu diğer metil esterlere göre en düşük değere sahiptir. Bu ve diğer fiziko-kimyasal parametrelerin birlikte etkileşimi ile yakıt sprey karakteristikleri değişmiş ve bu durum özellikle FME’ne ait numuneleri ile yapılan deneylerde çevrimden çevrime olan farkları artırmıştır. Şekil 4.23(c)’de ise maksimum basınç verilerinin neredeyse tüm yakıt karışımlarında sırasıyla ayçiçek, kanola, mısır, soya ve fındık metil esterlerinde giderek arttığı görülmektedir. Çevrimsel farklardaki artış, Şekil 4.23(d)’den de benzer şekilde görülmektedir. İlgili şekilde verilen maksimum basınç değerlerinin kovaryansı özellikle B100 şartlarında ve FME çalışmalarında artış göstermektedir.

Yalnızca mısır yağında küçük sapmalar vardır. Üstelik tüm yakıt karışımlarında yaklaşık aynı seviyelerde maksimum basınç verileri gözlenmiştir. Bu durum Şekil 2.24 ile verilen setan sayısı değişimi ile paralellik arz etmektedir. Setan sayının artması, yanma süresini kısaltmış ve silindir hacminin daha küçük değerlerde bulunduğu aralıkta yanma etkisini artırarak maksimum basıncın artmasına neden olmuştur.

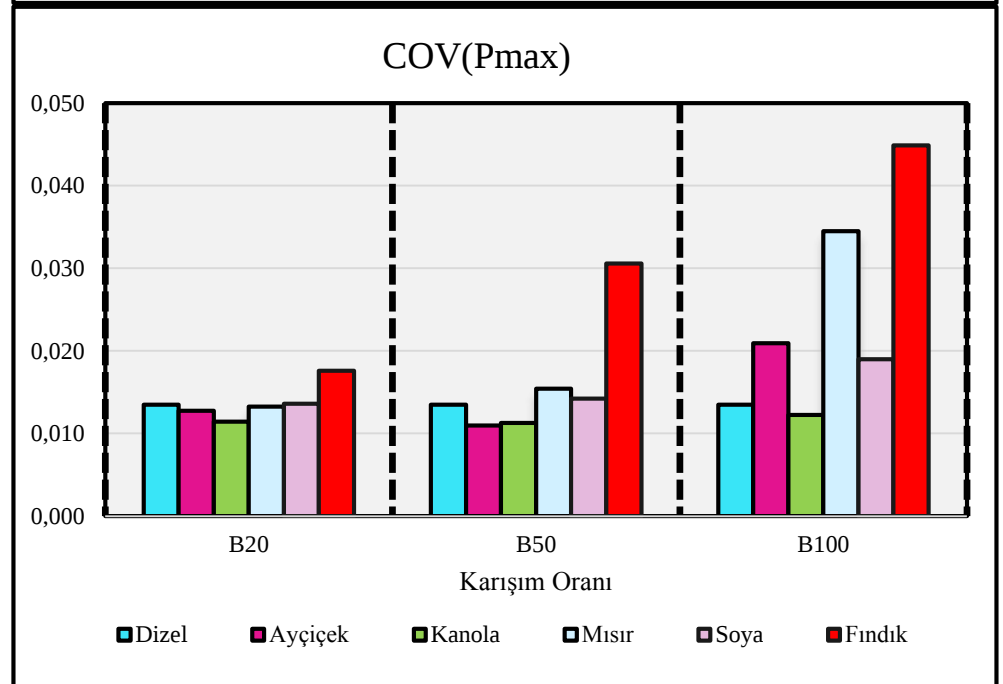


Şekil 4.23. (devam)

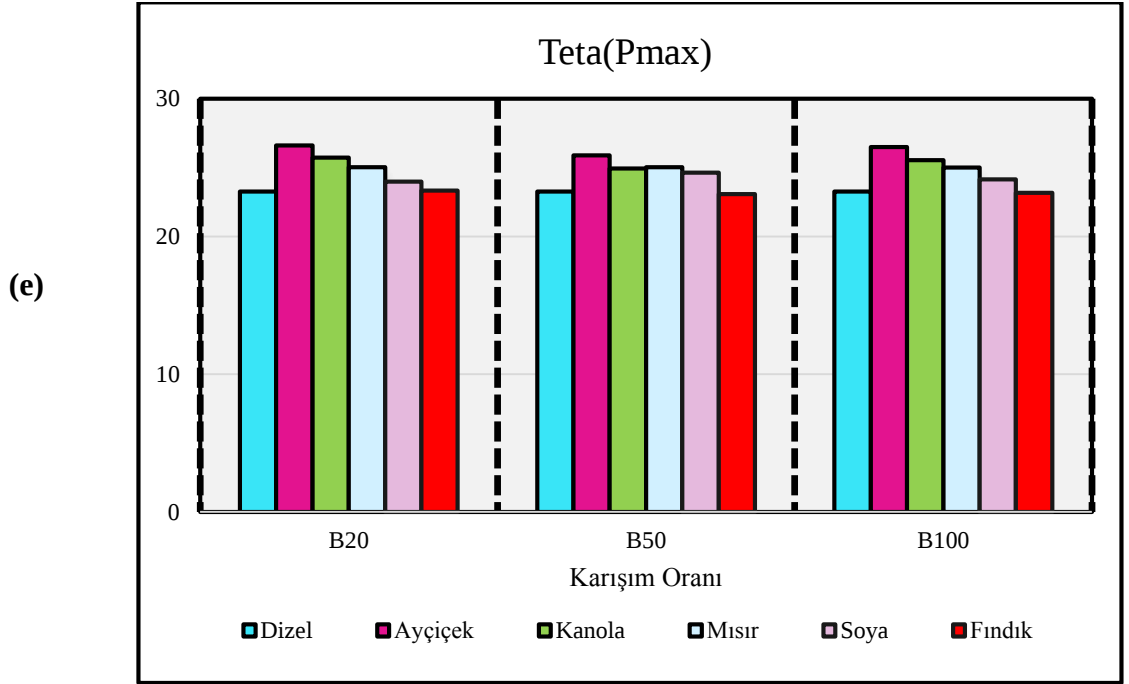
(c)



(d)



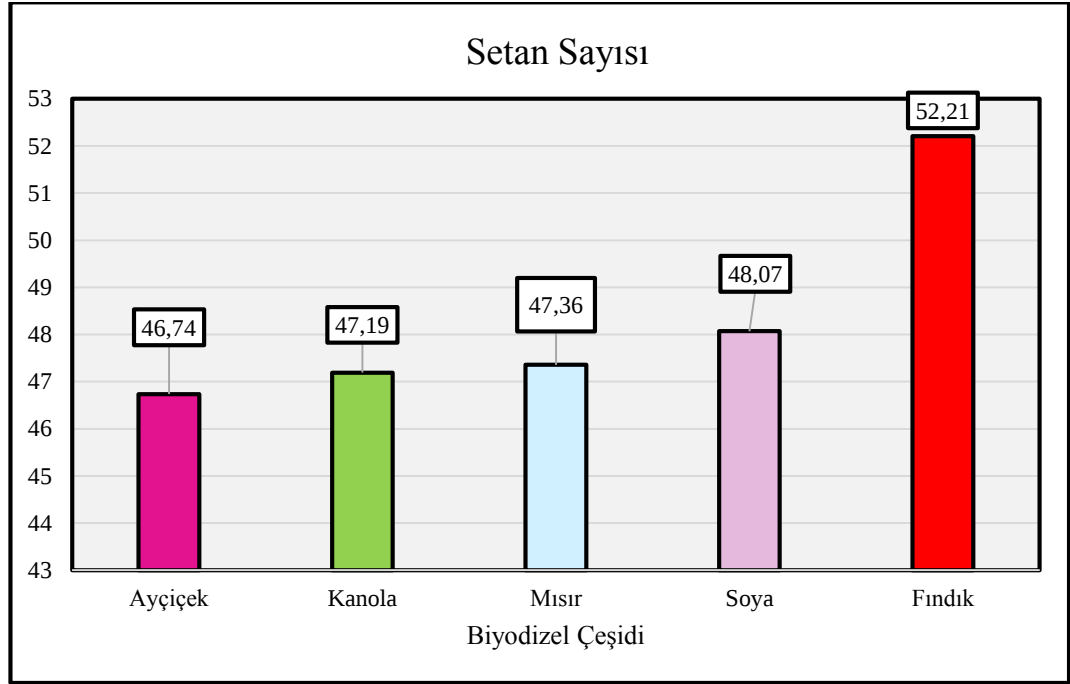
Şekil 4.23. (devam)



Şekil 4.23. İndike motor karakteristiklerinin değişimi (2000 d/dak)

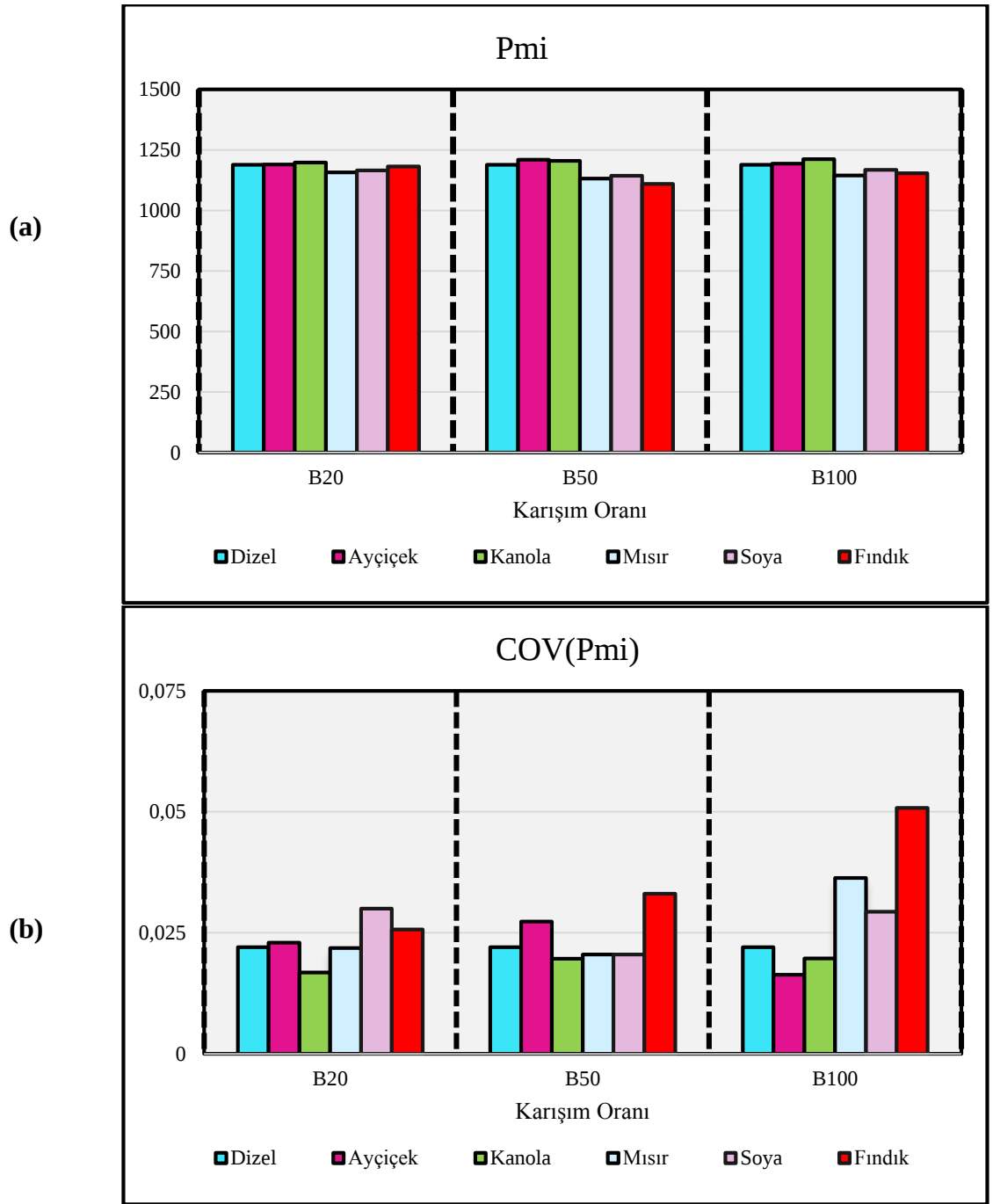
(a) indike ortalama efektif basınç (b) indike ortalama efektif basınç verilerin kovaryansı (c) maksimum basınç (d) maksimum basınç değerlerinin kovaryansını (e) maksimum basınç değerlerinin görüldüğü krank mili açısı değerleri

Şekil 4.24(e) ile verilen her bir çevrimde görülen maksimum basınç değerlerinin görüldüğü krank mili açısı verileri incelendiğinde de bu durum açıklanabilmektedir. Sırasıyla ayçiçek, kanola, mısır, soya ve fındık yağı metil esterleriyle yapılan deneylerde maksimum basınçlar üst ölü noktaya daha yakın krankmili değerlerinde görülmüştür. Bilindiği üzere yanma hızı arttıkça taranan hacmin daha yanma odası hacmine yakın olduğu krank mili açısı değerlerinde görülen basınç seviyesi artmaktadır. Verilen sıralama ile biyodizel deneylerinden elde edilen maksimum basınç seviyesi artarken, maksimum basıncın görüldüğü krank mili açısı azalmaktadır. Bu durum motor performansını olumlu yönde etkilemiştir. Ancak açıktır ki bu durum çevrimsel farklarla da ilişkilidir. Özellikle karışım içerisinde FME oranının artması ile çevrimsel farkların arttığı ve bunun sonucunda maksimum basınç ve indike ortalama efektif basınç verilerinin de arttığı bir ilişki bulunmaktadır.



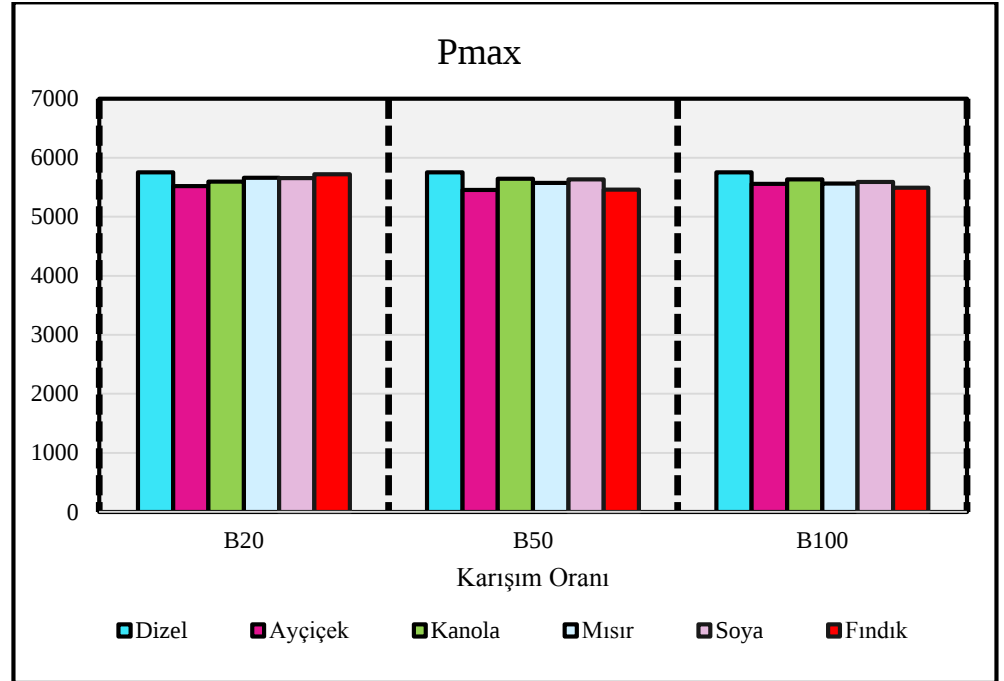
Şekil 4.24. Yakıtların setan sayıları

Şekil 4.25’de aynı indike motor karakteristik değerlerinin 1400 d/dak devir sayısında alınan ölçümlerden hesaplanan verileri sunulmuştur. Şekil 4.25(a)’da indike ortalama efektif basınç verileri, 4.25(b)’de indike ortalama efektif basınç verilerin kovaryansı, 4.25(c)’de her bir çevrimde görülen maksimum basınç değerlerini, 4.25(d)’de her bir çevrimde görülen maksimum basınç değerlerinin kovaryansını 4.25(e)’de her bir çevrimde görülen maksimum basınç değerlerinin görüldüğü krank mili açısı değerleri bulunmaktadır. Bu sonuçlarda da, Şekil 4.23 ile verilen sonuçlara benzer sonuçlar elde edilmiştir. Yanma süresi büyükten küçüğe sırasıyla ayçiçek, kanola, mısır, soya ve fındık yağından üretilen biyodizellerde elde edilmiştir. İndike ortalama efektif basınç verilerinin kovaryansı incelendiğinde en yüksek sonuçların yine FME’ne ait olduğu görülmektedir. Bu durumun yine setan sayısı ile ilişkili olduğu düşünülmektedir. 2000 devir/dak devir sayısına ait Şekil 4.23 ile 1400 dev/dak devir sayına ait bu iki sonuç karşılaştırıldığında, yüksek devir sayısında biyodizel kullanılması durumunda daha yüksek performans elde edildiği söylenebilir.

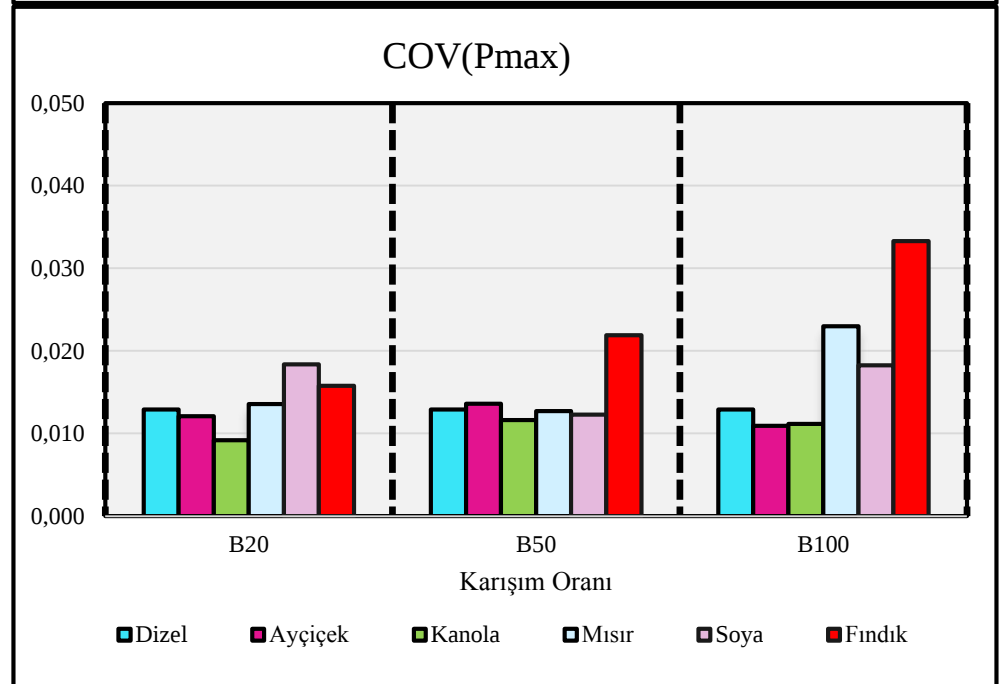


Şekil 4.25. (devam)

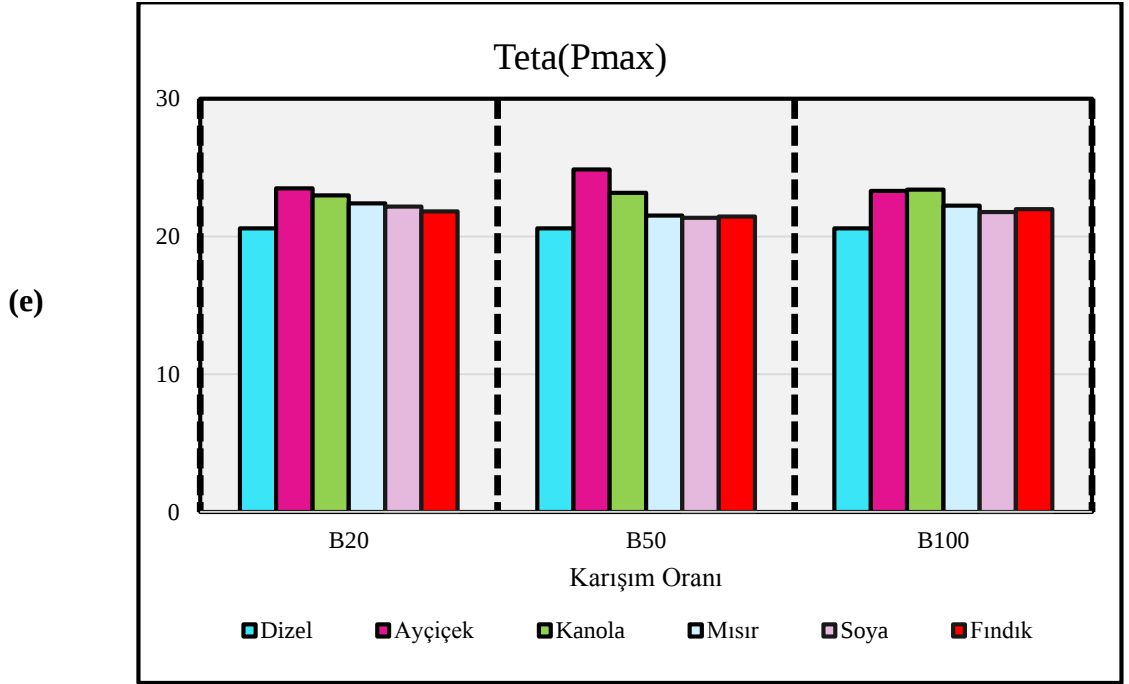
(c)



(d)



Şekil 4.25. (devam)



Şekil 4.25. İndike motor karakteristiklerinin değişimi (1400 d/dak)

(a) indike ortalama efektif basınç (b) indike ortalama efektif basınç verilerin kovaryansı (c) maksimum basınç (d) maksimum basınç değerlerinin kovaryansını (e) maksimum basınç değerlerinin görüldüğü krank mili açısı değerleri

4.5. Çevrimsel Basınç Farklarının Wavelet Analizi Metoduyla İncelenmesi

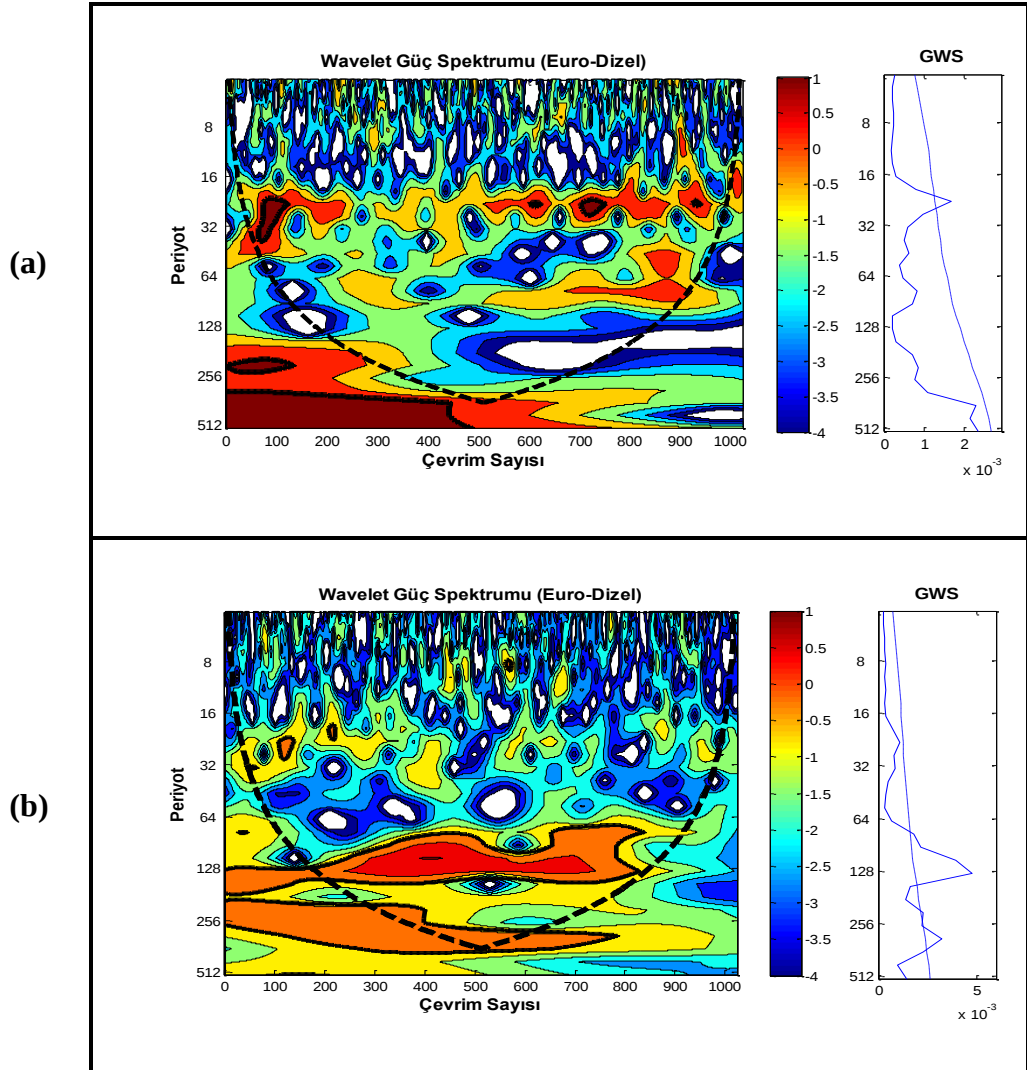
Wavelet Analiz metodu ile yapılan çevrimsel farklılıkların analizinde, COV analizinde dikkate alınmayan zaman dizilerindeki spektral karakteristikler hesaba katılmaktadır. Bu nedenle çalışmanın bu kısmında, Pmi basınç değerlerinin çevrimsel farklılıkları Wavelet Analiz metodu kullanılarak incelenmiştir. Analiz işleminde Wavelet analiz metodu olarak SWA ve dalgacık modeli olarak Morlet ana dalgacık modeli seçilmiştir. SWA, farklı periyotlardan ve anlık değişimlerden kaynaklanan zaman dizilerinin, spektral karakteristiklerini zaman-periyot (veya zaman-frekans) alanına çizer. Beş farklı metil esterleri (AME, KME, SME, FME, MME) sırasıyla B20 karışımı, B50 karışımı ve B100 yakıtı kullanılarak elde edilen Pmi değerlerine ait çevrimsel basınç farklılıkları incelenmiştir. Analizler Bölüm 4.2 ve Bölüm 4.4’de tespit edilen en kararlı çalışma devri olan 1400 dev/dak ve 2000 dev/dak devir sayıları için yapılmıştır. Her bir metil esteri karışım oranına ve devir sayısına göre karşılaştırılarak analiz edilmiştir.

Wavelet analizleri, Matlab programı kullanılarak yapılmıştır. Sonuçlar her metil esteri için hem Wavelet güç spektrum grafiklerinde hem de global Wavelet spektrumlarında (GWS) incelenmiştir. Wavelet güç spektrum grafikleri periyodikliğin etkili olduğu periyot ve çevrim aralığını tanımlarken, GWS değerleri periyodikliğin yoğunluğu hakkında bize bilgi sunmaktadır. Güç spektrum grafiklerinde kırmızı renk yüksek gücü, mavi renk düşük gücü göstermekte, diğer renkler ara güçleri göstermektedir. Wavelet güç spektrum garfğinde siyah çizgi ile tanımlanan bölgeler ve GWS'deki mavi kesikli çizgi %95 güven aralığındaki değerleri tanımlamaktadır. Wavelet güç spektrumunda tanımlanan kesikli siyah eğri ise koni etkisini göstermektedir. Koni etkisi, zaman dizilerinin tamamının eşleştirilmesi durumundaki kenar etkisini içermektedir. Bu nedenle koni etkisi dışındaki analizler değerlendirmeye alınmazken, iç kısımdakiler değerlendirilir. GWS değeri, tepe gücünü gösterir ve periyotla aynıdır.

4.5.1. Dizel yakıta ait Pmi değerlerinin Wavelet analizi

Dizel yakıtın kullanılması durumunda elde edilen Pmi değerlerine ait Wavelet Analizi Şekil 4.26'da görülmektedir. Şekil 4.26(a) 1400 dev/dak, Şekil 4.26(b) 2000 dev/dak devir sayısı ait verilerin analizi bulunmaktadır. Şekil 4.26(a)'da 63-123 çevrim aralığında 21-39 periyotlarında, 601-624 çevrim aralığında 22-24 periyotlarında ve 702-751 çevrim aralığında 22-27 periyotlarında kısa süreli bir periyodiklik görülmektedir. Şekil 4.26(b)'de 183-794 çevrim aralığında 72-157 periyot bandında ve 397-625 çevrim aralığındaki 262-296 periyot bandında daha uzun süreli geniş bir periyodiklik vardır.

Şekil 4.26 incelendiği zaman periyodikliğin 1400 dev/dak devir sayısında yoğun olmaması, çevrimsel farklılıkların fazla olduğunu, buna karşın 2000 dev/dak devir sayısında ise daha fazla periyodikliğin gözlemlendiği ve sonuç olarak dizel yakıtın yüksek devirlerde çevrimsel farklılıklarının daha az olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 4.26. Dizel yakıtına ait Pmi değerlerinin Wavelet analizi

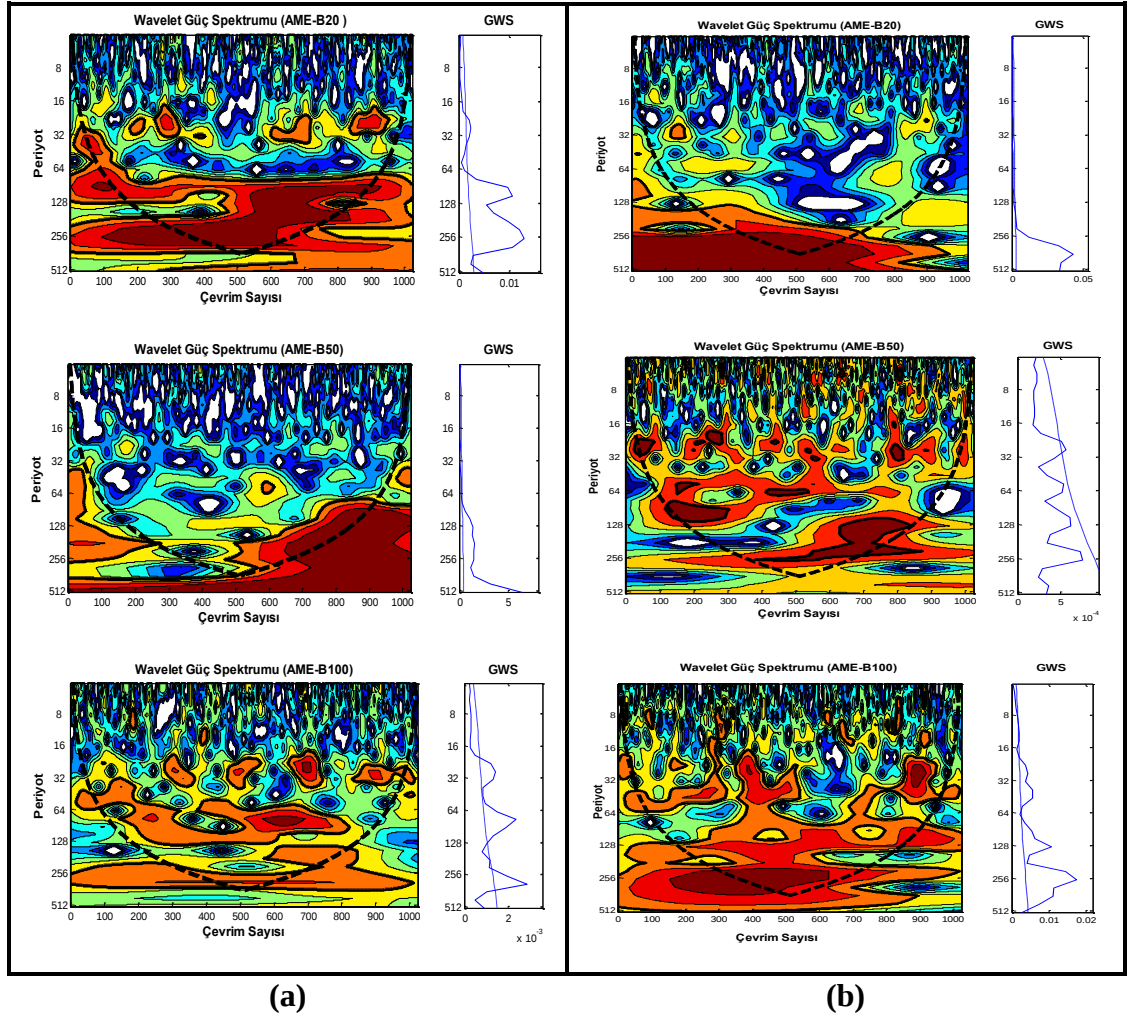
* (a) 1400 dev/dak (b) 2000 dev/dak

4.5.2. AME yakıtına ait Pmi değerlerinin Wavelet analizi

Şekil 4.27’de AME kullanılması durumundaki Pmi değerlerine ait Wavelet analizi yapılmıştır. Şekil 4.27(a) 1400 dev/dak, Şekil 4.27(b) 2000 dev/dak devir sayısı ait sırasıyla B20 karışımı, B50 karışımı ve B100 yakıtına ait Pmi değerlerinin Wavelet analiz grafikleri sunulmuştur.

Şekil 4.27(a)’daki her üç (B20, B50 ve B100) grafik incelediğimiz zaman, çevrimsel farklılıkların, B20 karışımında düşük periyotlarda, B50 karışımında yüksek periyotlarda

ve B100 yakıtında ise dağınık bir şekilde olduğu görülmektedir. Şekil 4.27(b) incelendiği zaman, periyodikliğin B100 yakıtına doğru belirgin bir şekilde arttığı görülmektedir. Her iki durum GWS grafiğinde açık bir şekilde görülmektedir.



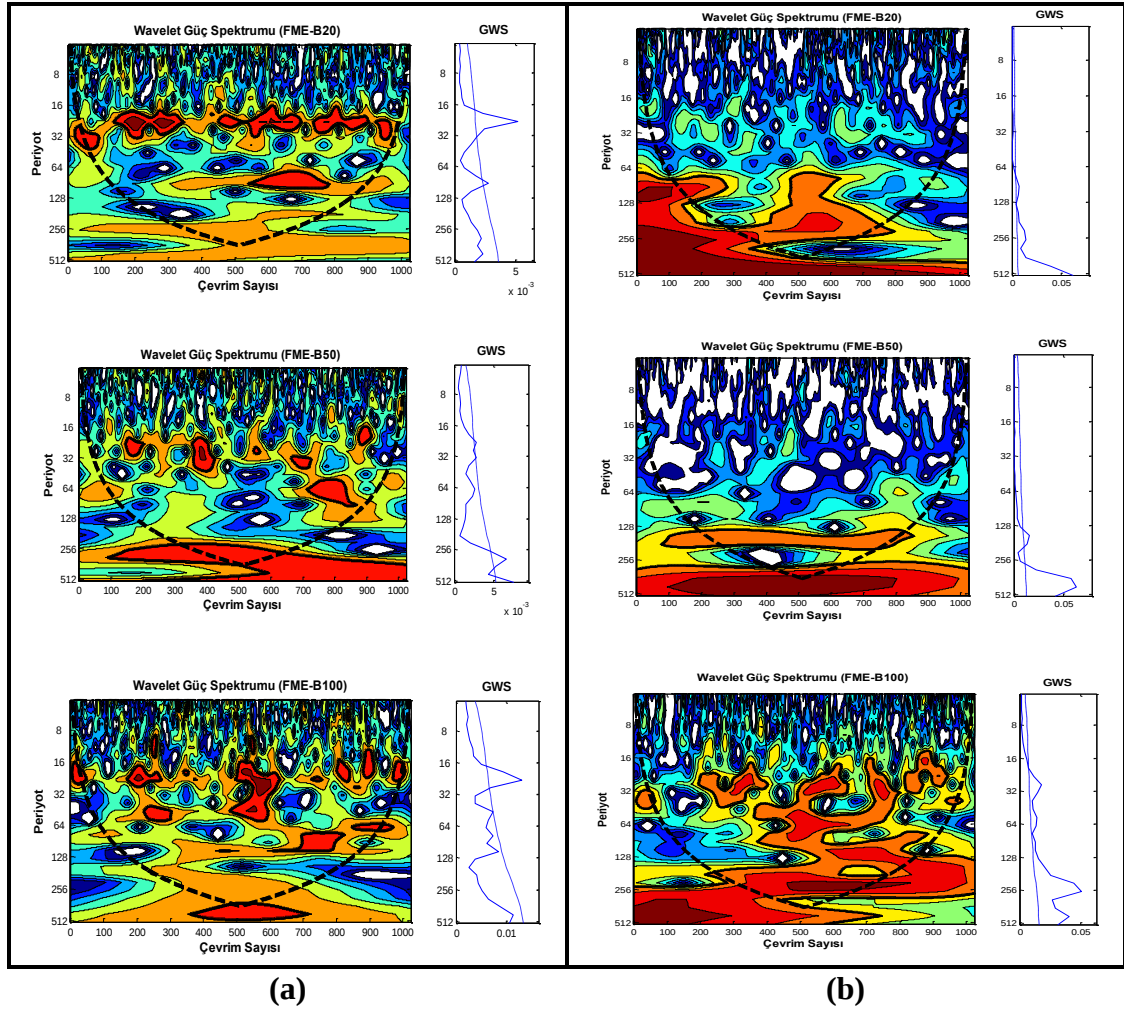
Şekil 4.27. AME'ne ait Pmi değerlerinin Wavelet analizi

* (a) 1400 dev/dak (b) 2000 dev/dak

4.5.3. FME yakıtına ait Pmi değerlerinin Wavelet analizi

Şekil 4.28'de FME kullanılması durumundaki Pmi değerlerine ait Wavelet analizi yapılmıştır. Şekil 4.28(a) 1400 dev/dak, Şekil 4.28(b) 2000 dev/dak devir sayısı ait

sırasıyla B20 karışımı, B50 karışımı ve B100 yakıtına ait Pmi değerlerinin Wavelet analiz grafikleri sunulmuştur.



Şekil 4.28. FME'ne ait Pmi değerlerinin Wavelet analizi

* (a) 1400 dev/dak (b) 2000 dev/dak

Şekil 4.28(a)'daki güç spektrum değerleri incelediğimiz zaman, B20 karışımında yaklaşık 19-20 periyot aralığında periyodiklik varken bu durum B50 karışımında ortadan kaybolmuştur. B100 yakıtında ise özellikle 500-593 çevrim aralığında 16-59 periyodundaki geniş bir bölgede periyodiklik bulunmaktadır. Şekil 4.28(b)'de devir sayısının artmasıyla periyodikliğin frekansının azaldığı (periyodunun arttığı) görülmektedir. B20 karışımında 319-752 çevrim sayılarında yaklaşık 130-265 aralığında periyodiklik vardır. B50 karışımında 195-762 çevrim sayılarında 141-197 bandında

(B20'ye oranla daha dar bir frekans aralığında) periyodiklik vardır. B100 yakıtında ise periyodikliğin daha da geniş frekans alanına yayılmaktadır. GWS grafiklerinde bu durumu daha belirgin bir şekilde görülmektedir.

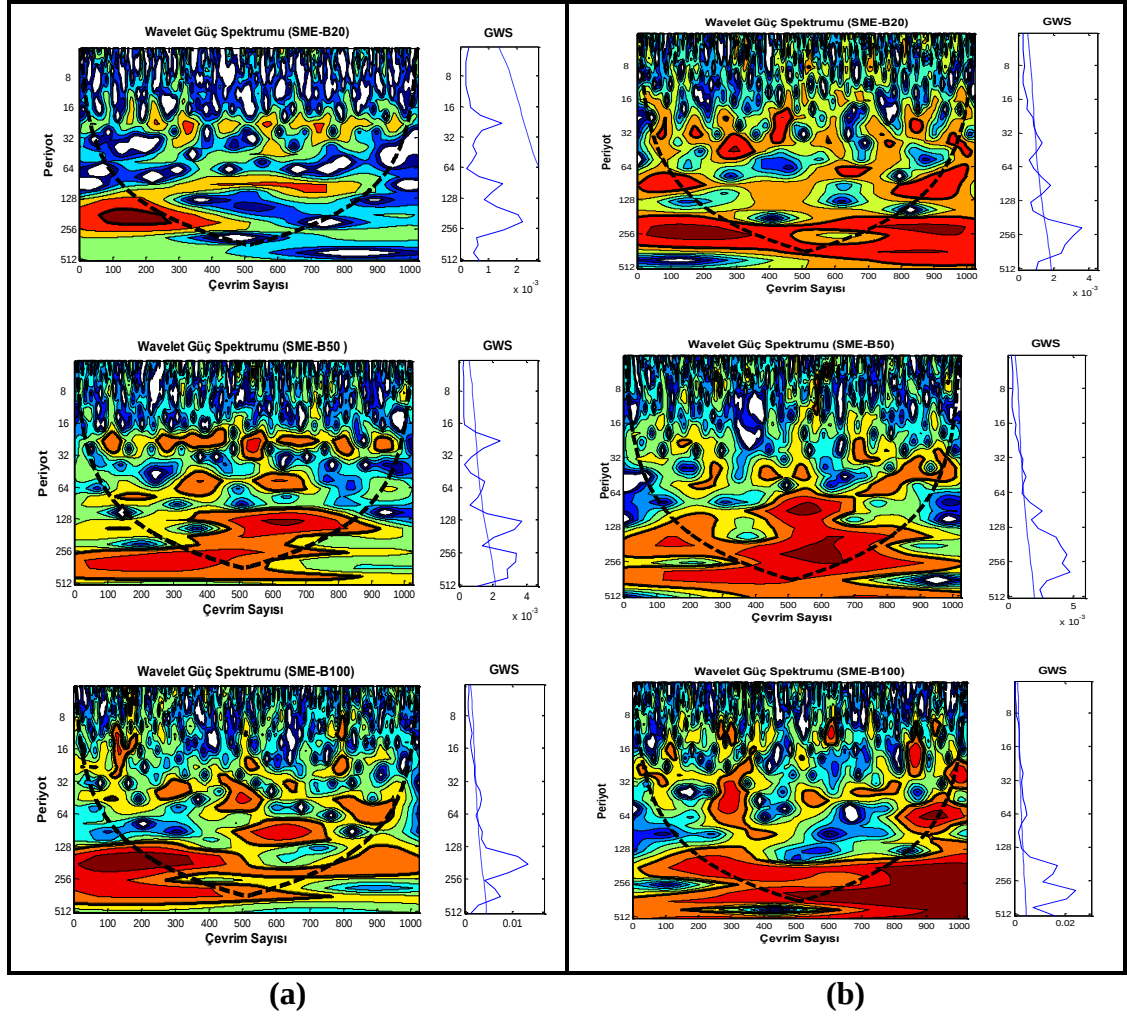
4.5.4. SME yakıtına ait Pmi değerlerinin Wavelet analizi

Şekil 4.29'da SME kullanılması durumundaki Pmi değerlerine ait Wavelet analizi yapılmıştır. Şekil 4.28(a) 1400 dev/dak, Şekil 4.28(b) 2000 dev/dak devir sayısı ait sırasıyla B20 karışımı, B50 karışımı ve B100 yakıtına ait Pmi değerlerinin Wavelet analiz grafikleri sunulmuştur.

Şekil 4.29(a)'daki güç spektrum değerleri incelediğimiz zaman, B20 karışımında %95 güven aralığında herhangi bir periyodikliğin bulunmadığı, buna karşın B50 karışımında farklı periyotlarda (global 23, 55, 132, 255), periyodikliğin yoğun olduğu görülmektedir. B100 yakıtında, B50 karışımına oranla nispeten daha az periyodiklik vardır. Şekil 4.29(b)'de devir sayısının artmasıyla periyodikliğin her üç durum için de daha da belirginleştiği görülmektedir. Özellikle düşük frekanslarda periyodikliğin arttığı GWS grafiklerinden açıkça görülmektedir.

4.5.5. KME yakıtına ait Pmi değerlerinin Wavelet analizi

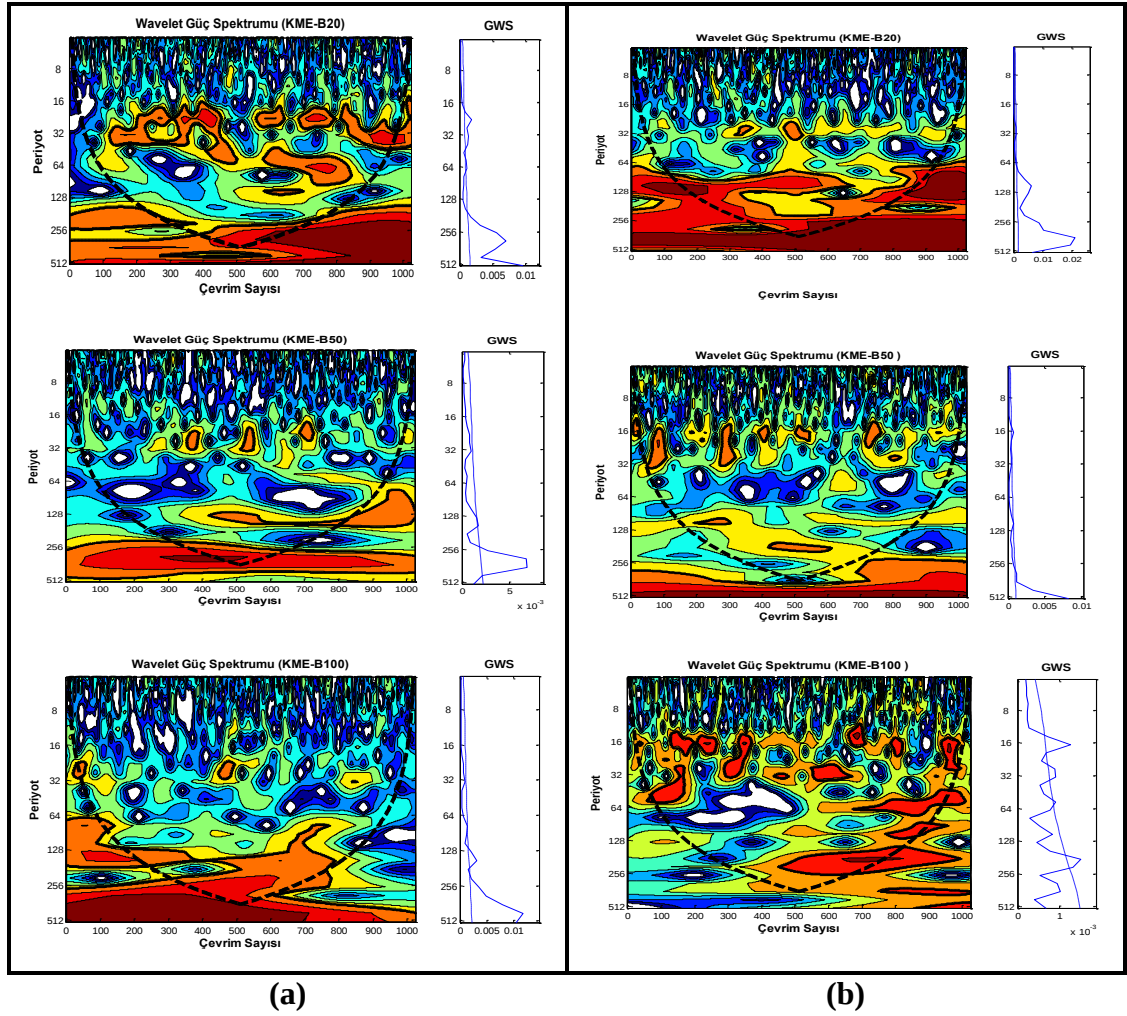
Şekil 4.30'da KME kullanılması durumundaki Pmi değerlerine ait Wavelet analizi yapılmıştır. Şekil 4.28(a) 1400 dev/dak, Şekil 4.28(b) 2000 dev/dak devir sayısı ait sırasıyla B20 karışımı, B50 karışımı ve B100 yakıtına ait Pmi değerlerinin Wavelet analiz grafikleri sunulmuştur.



Şekil 4.29. SME'ne ait Pmi değerlerinin Wavelet analizi

* (a) 1400 dev/dak (b) 2000 dev/dak

Şekil 4.30(a)'daki güç spektrum değerleri incelediğimiz zaman, B20 karışımında yaklaşık 21-34 periyot aralığında ve global 314 periyot değerinde periyodiklik göze çarpmakta iken özellikle düşük periyotlardaki periyodikliğin B50 karışımında ve B100 yakıtında ortadan kalktığı görülmektedir. B50 karışımında ve B100 yakıtında daha yüksek periyot değerlerinde periyodiklik vardır. Şekil 4.30(b)'de, B20 karışımında düşük frekanslarda gözlemlenen periyodikliğin, B50 karışımında ortadan kalktığı, B100 yakıtında daha yüksek frekanslarda oluştuğu görülmektedir.



Şekil 4.30. KME'ne ait Pmi değerlerinin Wavelet Analizi

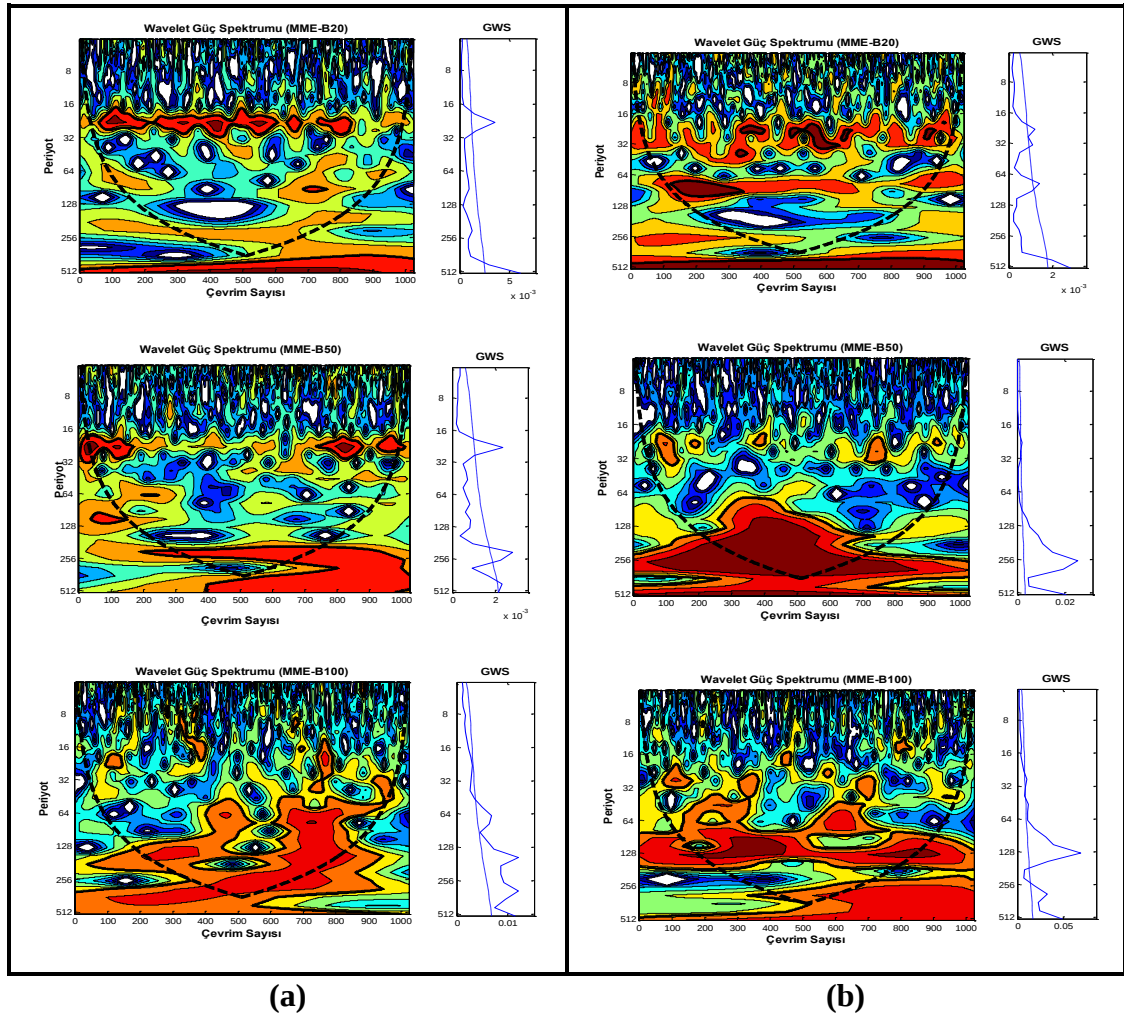
* (a) 1400 dev/dak (b) 2000 dev/dak

4.5.6. MME yakıtına ait Pmi değerlerinin Wavelet analizi

Şekil 4.31'da MME kullanılması durumundaki Pmi değerlerine ait Wavelet analizi yapılmıştır. Şekil 4.28(a) 1400 dev/dak, Şekil 4.28(b) 2000 dev/dak devir sayısı ait sırasıyla B20 karışımı, B50 karışımı ve B100 yakıtına ait Pmi değerlerinin Wavelet analiz grafikleri sunulmuştur.

Şekil 4.31(a)'da yaklaşık 19-26 periyot aralığında yoğun bir periyodiklik görülmektedir. B50 de bu periyottaki periyodikliğin daha az olduğu, ancak daha yüksek periyotlarda (global 223) periyodikliğin oluşmaktadır. B100 yakıtında ise; periyodikliğin daha yüksek

periyotlarda yoğun bir şekilde artmaktadır. Şekil 4.31(b)'deki karışımlar arasındaki ilişki Şekil 4.31(a)'ya benzemektedir. Ancak buradaki periyodikliğin daha yoğun olduğu hem Wavelet güç spektrum grafiklerinden hem de GWS grafiklerinden açıkça görülmektedir.



Şekil 4.31. MME'ne ait Pmi değerlerinin Wavelet Analizi

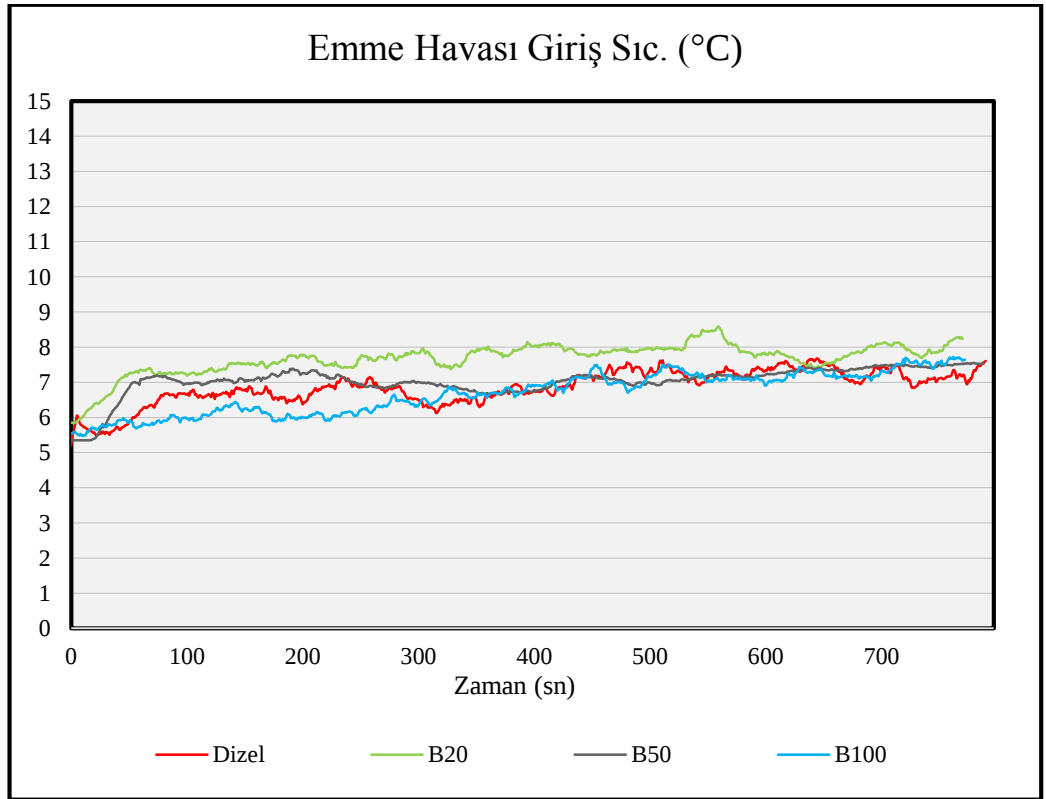
* (a) 1400 dev/dak (b) 2000 dev/dak

4.6. Soğukta Çalışma Performansı

Biyodizelin dizel yakıtla oranla en büyük dezavantajı soğuk akış özelliğinin kötü olmasıdır. Bu nedenle biyodizelin dizel motorlarda kullanımı yönündeki en büyük engel ilk çalışma problemi. Çalışmamız bu kısmında, biyodizelin soğuk çalışma ortamındaki ilk hareket kapasitesi incelenmiştir.

Motorun soğukta çalışma deneyleri laboratuvar ortamında yapılmıştır. Test ünitesindeki motorumuzun bulunduğu ortam $5,5^{\circ}\text{C}$ değerine kadar soğutulmuş, daha düşük sıcaklıklara laboratuvardaki mevcut tesisatına zarar vermemek için düşülmemiştir. Motor blokunun ortam havasıyla kararlı hale gelmesi için 10 saat beklenilmiştir. Çalışmada yakıt olarak diğer biyodizel yakıtlara göre daha yüksek verime sahip olduğu için FME kullanılmış ve elde edilen değerler dizel yakıt ile karşılaştırılmıştır.

Şekil 2.32’de motor girişinden alınan emme havası sıcaklık değerleri grafiğinden, motorun çalışma başlangıç şartlarının aynı olduğu (yani motorun çevre havası ile kararlı hale geldiği) ve tüm deney şartlarının aynı ortamda yapıldığı görülmektedir.



Şekil 4.32. Emme havası sıcaklık değişimi

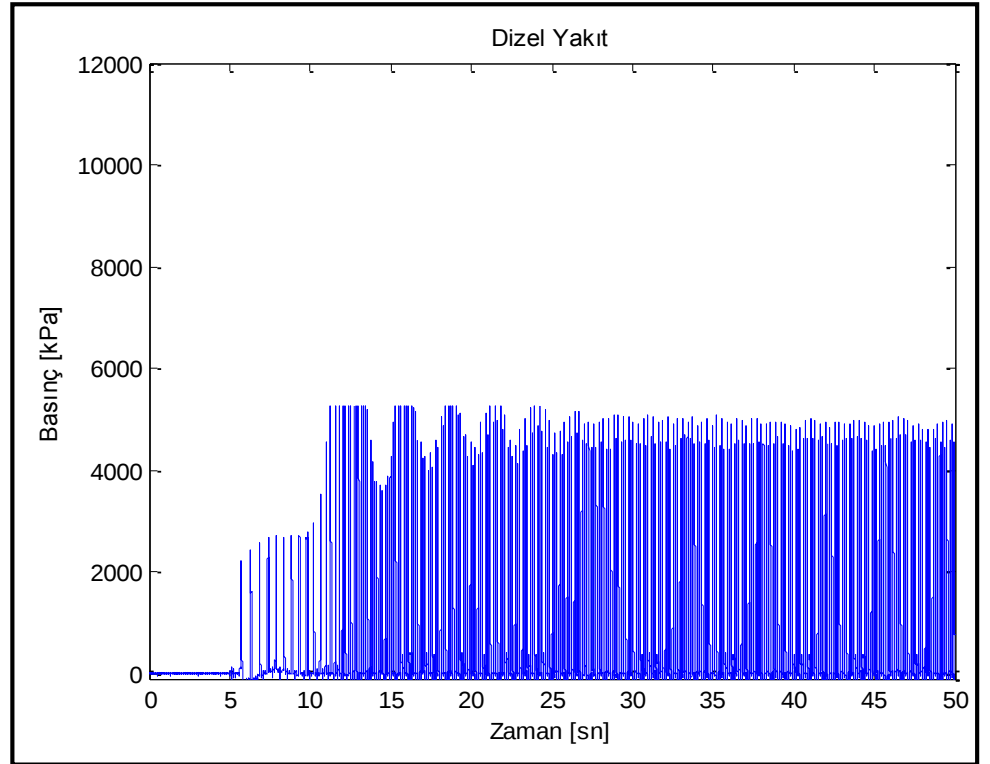
Şekil 4.33’de; $5,5^{\circ}\text{C}$ ’de soğutulan motorun ilk çalıştırma esnasında tespit edilen silindir içi basınç verileri görülmektedir. 4.33(a)’da dizel yakıt, 4.33(b-d)’de FME ait sırasıyla B20 karışımı, B50 karışımı ve B100 yakıtına motorun ilk çalıştırılması durumdaki Pmi

değerleri görülmektedir. Şekil 4.33. incelendiğinde belirtilen şartlarda dizel yakıtın yaklaşık 5 sn'de, B20 FME yakıtının yaklaşık 17 sn'de, B50 FME yakıtının yaklaşık 23 sn'de ve B100 FME yakıtının yaklaşık 37 sn'de çalıştığı görülmektedir.

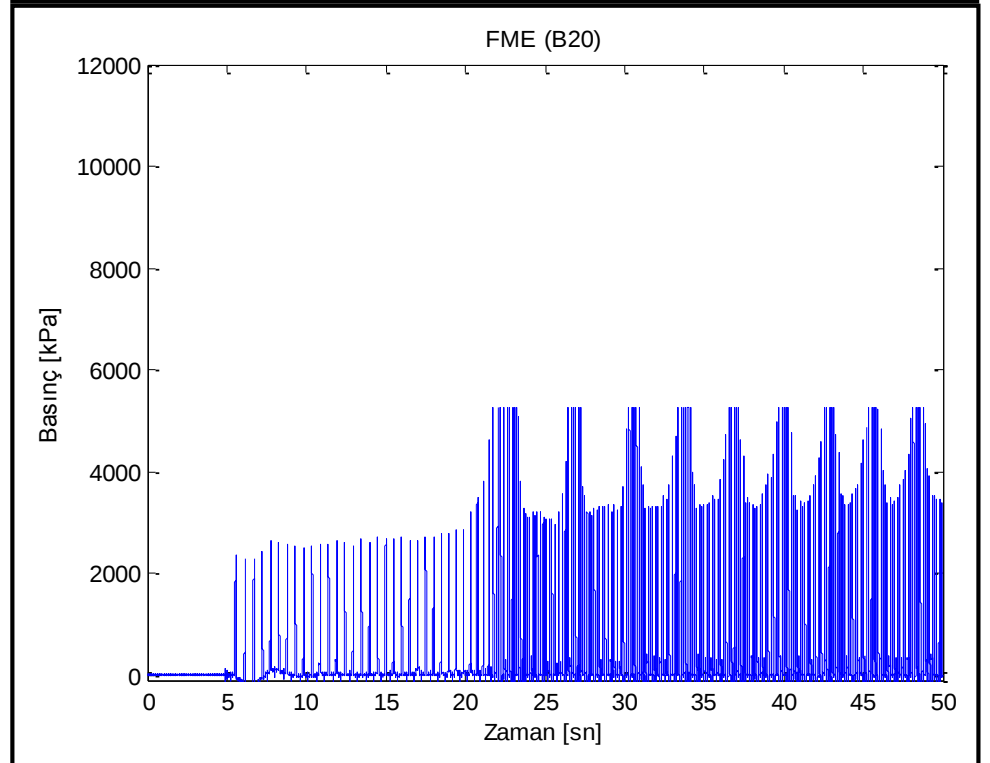
Şekil 4.33 ile biyodizelin ilk çalışma zorluğu üzerine etkisi gösterilmektedir. Sonuç olarak; karışımdaki biyodizel oranı arttıkça, motorun çalışma süresi de uzamakta, motorun çalışma performansı kötüleşmektedir.

Kararlı haldeki motorun çalışması sonucu oluşan CO emisyonlar ve değişimleri Şekil 4.12-13'de incelenmişti. Şekil 4.34'de ise motorun soğuk çalışması durumundaki CO emisyonlarının incelenmesi yapılmıştır. Şekil 4.28 ile dizel yakıtın CO emisyonunun en az olduğu, buna rağmen saf biyodizelin daha yüksek CO emisyonuna sahip olduğu görülmektedir. B20 ve B50 karışımındaki CO emisyon miktarları ise bu iki değer arasında yer almaktadır.

(a)

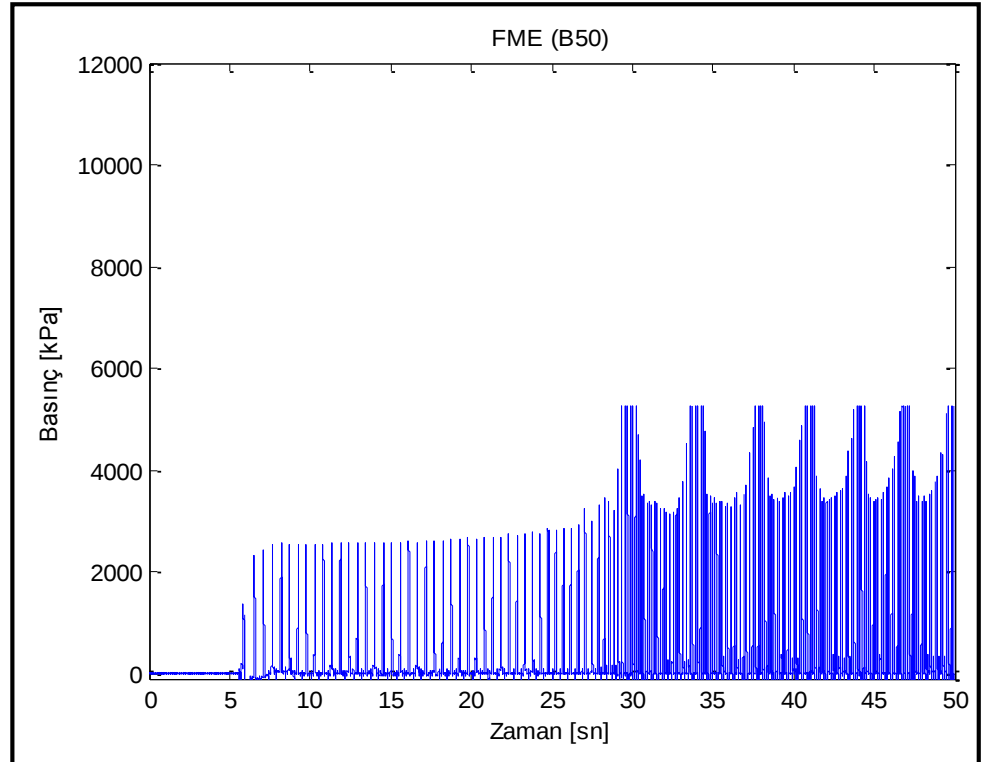


(b)

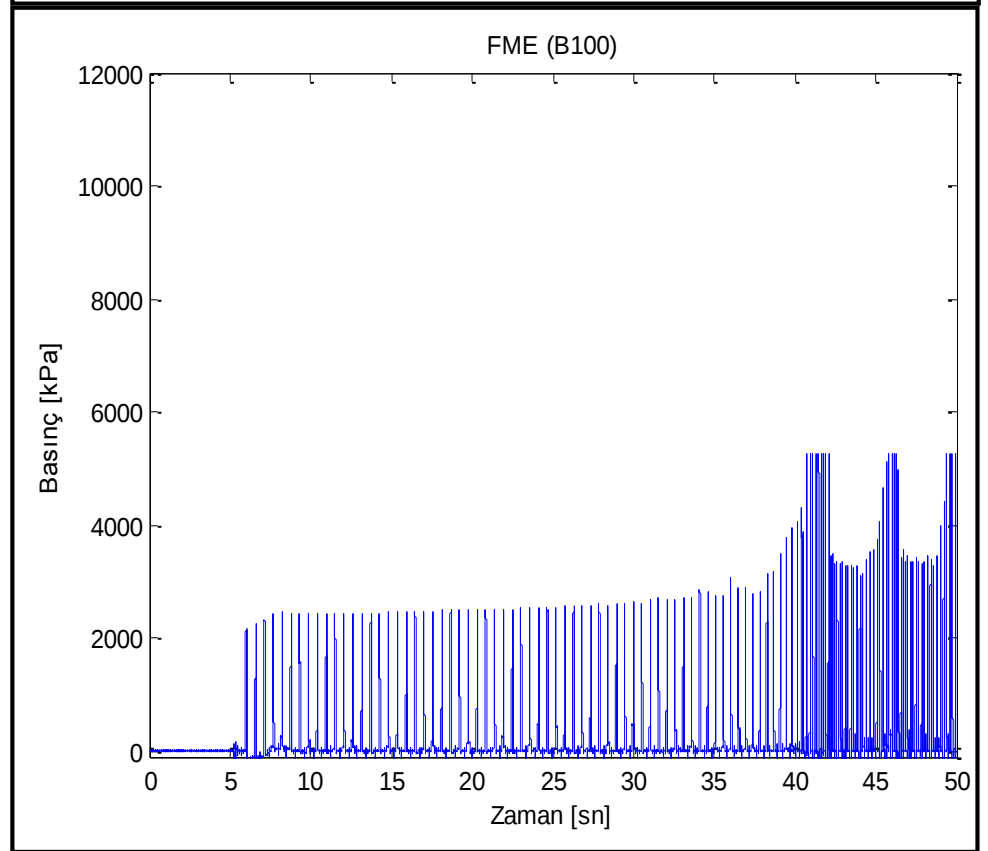


Şekil 4.33. (devam)

(c)

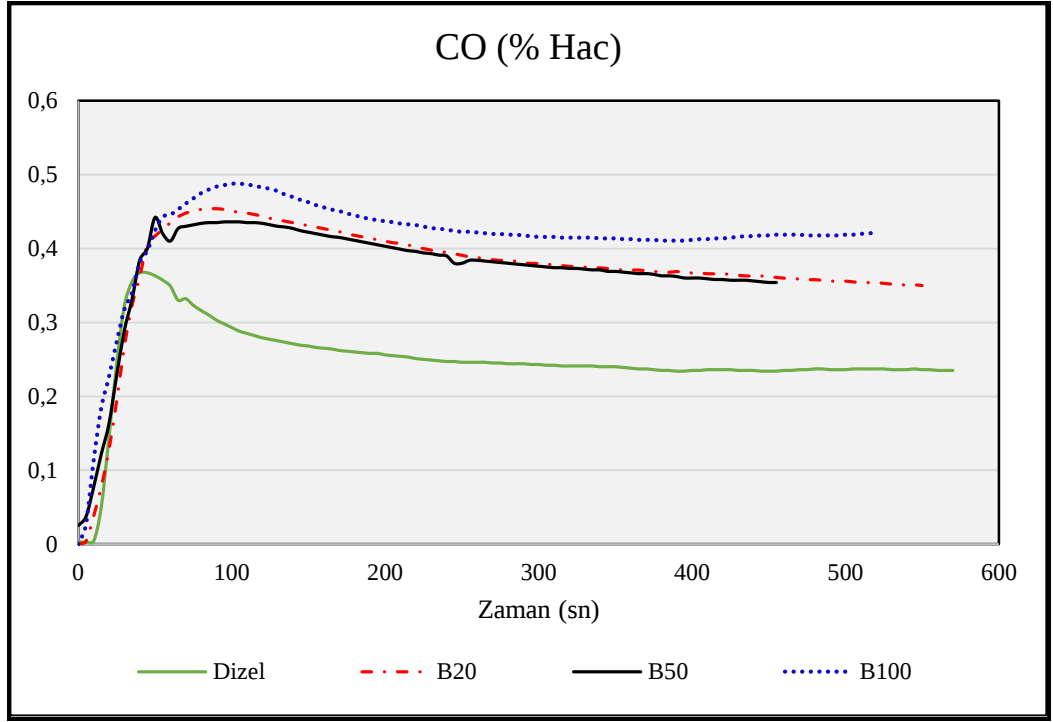


(d)



Şekil 4.33. Motorun ilk çalışma Pmi değerleri

* (a) Dizel Yakıt(b) FME B20 karışımı (c) FME B50 karışımı (d) FME B100 karışımı



Şekil 4.34. Soğuk çalışma durumunda CO emisyonu

5. SONUÇ

Dizel motorlarda dizel yakıtın yerine kullanılmak amacıyla, dizel yakıtı eşit nitelikte motor performansı sağlayan veya daha üstün niteliklere sahip bir alternatif yakıt araştırmasının yapıldığı bu çalışmada, edilen sonuçlar aşağıda sunulmuştur.

- **Biyodizelin fiziko-kimyasal özellikleri bitkisel yağlardan daha üstündür.**

Sahip olduğu enerji içeriği, kolay elde edilebilirliği, depolabilirliği, maliyetinin ucuz olması, bağımsız üretilebilirliği ve en önemlisi de kimyasal yapısının dizel yakıtı uygun olması nedeniyle, dizel yakıtlara alternatif olabileceği ifade edilen bitkisel yağların sahip olduğu fiziko-kimyasal özelliklerinin (yüksek viskozite, yüksek CFPP değeri vs.) yeterli nitelikte olmaması sonucu, dizel motorlara alternatif olarak kullanılamayacağı tespit edilmiştir. Bitkisel yağlardan kimyasal yöntemlerle elde edilen biyodizelin fiziko-kimyasal özellikleri bitkisel yağlardan daha üstündür ve dizel yakıtlara alternatif olabilir. Biyodizel bitkisel yağlar ile karşılaştırılınca, daha düşük viskozite, daha yüksek ısı enerjisi, daha iyi soğuk hava davranışına sahiptir.

- **Biyodizel kullanımı dizel motorlarda herhangi bir modifikasyon gerektirmez.**

Dünyada kullanılan dizel motor sayısının çok fazla olması nedeniyle, dizel yakıtı yerine alternatif olacak yakıtın, dizel motor ile uyumlu olması, motorda kullanılması durumunda herhangi bir yapısal düzenleme (veya alt yapı ihtiyacı) gereksinimi oluşturmaması arzu edilmektedir. Biyodizel kullanımı da dizel motorlarda herhangi bir değişiklik gerektirmediği için uygun bir alternatif yakıttır.

- **Biyodizel kullanımının dizel yakıtı göre avantajları vardır.**

Dizel yakıtı yerine kullanılacak biyodizelin, birçok yönden dizel yakıttan daha üstün özellikleri vardır. En önemli özelliği fosil kaynaklı bir yakıt olmamasıdır. Bu özelliği ülkelerin farklı bir ülkeye enerji bağımlılığını ortadan kaldırmaktadır. Yapısında kükürt olmadığı için yanması sonucu kükürtlü bileşenler oluşmadığı için temiz bir yakıttır. Moleküler yapısındaki yağlayıcılık özelliği nedeniyle, özellikle yakıt hattında aktif

yağlama yaparak enjektör, yakıt pompası gibi mekanik parçaların yakıt ömrünü uzatır. Kimyasal bileşenindeki oksijen molekülleri yanmanın kalitesini artırır. Alevlenme noktası sıcaklık değeri daha yüksek olduğu için taşıma depolama şartlarında dizel yakıttan daha güvenilir bir yakıttır.

- **Biyodizel kullanımının dizel yakıtı göre dezavantajları vardır.**

Biyodizel yakıtların yapılarındaki oksijen bileşeni nedeniyle, birim hacimdeki karbon ve hidrojen bileşeni daha az olduğu için daha düşük ısı kapasiteye sahiptirler. Bu nedenle aynı nitelikte dizel yakıttaki gücü elde edebilmek için tüketilen yakıt miktarı daha fazladır. Diğer taraftan aynı yakıt tüketiminde ise alınan güç değeri azalmaktadır. Bu durum biyodizel yakıtın, dizel yakıttan daha düşük verime sahip olduğunu göstermektedir. Biyodizel yakıtların soğuk davranış özellikleri dizel yakıttan kötüdür. Bu durum biyodizel numunelerin çalışma şartlarını kısıtlamakta, özellikle sıcaklığın 0°C altına düştüğü iklim bölgelerinde kullanımı zorlaştırmaktadır.

- **Biyodizelin motor performans değerleri dizel yakıtı yakındır.**

Biyodizel yakıtına ait yakıt tüketim değeri dizel yakıttan fazla, elde edilen güç değeri azdır. Bu nedenle biyodizel kullanılan bir motorun verimi de nispeten daha düşüktür. Ancak bu oran, yakıt tüketimi ve güçle aynı oranda değildir. Biyodizelin bazı özellikleri (yüksek yoğunluk, yağlayıcılık, yüksek oksijen bileşeni) motor veriminde artış sağlamaktadır.

- **Biyodizel kullanımı daha az miktarda NO_x, CO₂ emisyonuna ve daha fazla miktarda CO, HC emisyonuna neden olmaktadır.**

Biyodizelin moleküler bileşeni, moleküler yapısı ve diğer fiziko-kimyasal özelliklerinin etkisiyle deney sonucu tespit edilen egzoz değerlerinde hem CO₂ emisyonu için hem de NO_x emisyonu için azalma olmaktadır. Benzer şekilde hem CO hem de HC emisyon değerlerinde artış tespit edilmiştir. Duman emisyon davranışında bir kararsızlık söz konusudur. B50 karışımında elde edilen duman miktarı dizel yakıt ile hemen hemen aynı iken B20 karışımında dizel yakıtı göre azalma ancak B100 yakıtında ise artma

görülmektedir. Bu durum, dizel yakıta ilave edilen biyodizelin karışımın fiziko-kimyasal ve yanma özelliklerini değiştirdiğini göstermektedir.

- **Soğukta çalışma performansı**

Biyodizel yakıtların düşük sıcaklıklarda ilk hareket zorluğu vardır. Bu zorluk, biyodizelin karışım oranı ile birlikte artmaktadır.

- **Biyodizelin çevrimsel farklar üzerine etkisi olumludur**

1400 dev/dak ve 2000 dev/dak devir sayıları için karşılaştırma yapılan biyodizel numunelerindeki Pmi değerlerinin COV ve Wavelet Analiz metoduyla analiz edilmesi durumunda elde edilen en genel sonuca göre; (1)dizel yakıta oranla biyodizel kullanılması durumunda çevrimsel farklılıkların azaldığı, (2) biyodizel numuneleri arasında ise; çevrimsel farklılıklar devri sayısının artmasıyla ve karışımdaki biyodizel yüzdesinin artmasıyla azaldığı görülmektedir. İstatistiki olarak ortalama değerleri analiz eden COV’da sadece FME değerinin arttığı tespit edilmiştir.

KAYNAKLAR

- Abbak, R. Alpay. Jeodezide Zaman Dizilerinin Dalgacık (Wavelet) Analizi. Doktora Semineri, Konya: http://193.255.101.90/~aabbak/pubs/Phd_seminar.pdf, 2007.
- Abbas, MK, and IL Davis. "The composition of organic fraction of particulate emission of a diesel engine operated on vegetable oil." SAE, 1990.
- Adams, C., J.F. Peters, M.C. Rand, B.J. Schroer, and M.C. Ziemke. "Endurancetests." JAOCS60, 1983: 1574±1579.
- Agarwal, Avinash Kumar. "Biofuels (alcohols and biodiesel) applications as fuels for internal combustion engines." Progress in Energy and Combustion Science 33 (2007): 233-271.
- Altın, Recep, Selim Çetinkaya, and Hüseyin Serdar Yücesu. "The potential of using vegetable oil fuels as fuel for diesel engines." Energy Conversion and Management, no. 42 (2001): 529-538.
- Altun, Şehmus, ve M. Atilla Gür. «Bitkisel Yağların Alternatif Yakıt Olarak Dizel Motorlarında Kullanılması.» Harran Üniversitesi Ziraat Fak. Dergisi, 2005: 35-42.
- Anonim. Bitkisel Atık Yağların Yönetimi. Yönetmelik, Ankara: Çevre Yönetimi Genel Müdürlüğü, T.C. Çevre ve Orman Bakanlığı, 2010.
- Anonim. Fındık Toplama ve Hasat Kurutma Yöntemleri Üzerine Araştırma ve Fizibilite Çalışması. Ordu: Ünye Ticaret Borsası, 2013b.
- Anonim. Petrol Piyasası Sektör Raporu. Yıllık Rapor, Ankara: Petrol Piyasası Dairesi Başkanlığı, T.C. Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu (EPDK), 2013a.
- Anonim. Yağlar ve Yağ Analizleri. Ankara: TC. Milli Eğitim Bakanlığı (MEGEP Yayınları), 2008.
- Anonim. Yağlı Tohumlar. Ankara: Türkiye İstatistik Kurumu, 2012.
- Arı, Niyazı, Şükrü Özen, ve Ömer H.Çolak. Dalgacık Teorisi (Wavelet). Ankara: Palme, 2008.
- Atabani, A.E., A.S. Silitonga, Irfan Anjum Badruddin, T.M.I. Mahlia, H.H. Masjuki, and S. Mekhilef. "A comprehensive review on biodiesel as an alternative energy resource and its characteristics." Renewable and Sustainable Energy Reviews, no. 16 (2012): 2070– 2093.
- Bosch. Automotive Handbook. 7th. Leonberg, 2007.
- Bozbas, Kahraman. "Biodiesel as an alternative motor fuel: Production and policies in the European Union." Renewable and Sustainable Energy Reviews, no. 12 (2008): 542–552.
- Bryant, Lynwood. "The development of the diesel engine." (The Johns Hopkins University Press), no. 3 (July 1976): 432-446.
- Buyukkaya, Ekrem. "Effects of biodiesel on a DI diesel engine performance, emission and combustion characteristics." Fuel, no. 89 (2010): 3099–3105.
- Canakci, Mustafa, Ahmet Necati Ozsezen, and Ali Turkcan. "Combustion analysis of preheated crude sunflower oil in an IDI diesel engine." Biomass and Bioenergy, no. 33 (2009): 760-767.
- Ceviz, M. Akif, Asok K. Sen, Alp K. Küleri, and İ. Volkan Öner. "Engine performance, exhaust emissions, and cyclic variations in a lean-burn SI engine fueled by

- gasoline/hydrogen blends." *Applied Thermal Engineering*, no. 36 (2012): 314-324.
- Ceviz, M.A., and F. Yüksel. "Cyclic variations on LPG and gasoline-fuelled lean burn SI engine." *Renewable Energy*, no. 31 (2006): 1950-1960.
- Chang, Chia-Chu, and Shen-Wu Wan. "China's motor fuels from tung oil." *Industrial and Engineering Chemistry*, December 1947: 1543-1548.
- Chattopadhyay, Soham, and Ramkrishna Sen. "Fuel properties, engine performance and environmental benefits of biodiesel produced by a green process." *Applied Energy*, no. 105 (2013): 319-326.
- Chuepeng, S. "The use of biodiesel in diesel engines." *Biodiesel- Quality, Emissions and By-Products (InTech)*, november 2011.
- Colaço, Marcelo J., Cláudio V. Teixeira, and Luciana M. Dutra. "Thermal analysis of a diesel engine operating with diesel-biodiesel blends." *Fuel*, no. 89 (2010): 3742-3752.
- Dunn, Robert O. "Oxidative stability of soybean oil fatty acid methyl esters by oil stability index (OSI)." *Food & Industrial Oils Research (JAOCS)* 5, no. 82 (May 2005).
- Enweremadu, C.C., and H.L. Rutto. "Combustion, emission and engine performance characteristics of used cooking oil biodiesel; A review." *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, no. 14 (2010): 2863-2873.
- Ferguson, Colin R., and Allan T Kirkpatrick. *Internal combustion engines: applied thermosciences*. New York: John Wiley & Sons, 2001.
- Fontaras, Georgios, et al. "Effects of biodiesel on passenger car fuel consumption, regulated and non-regulated pollutant emissions over legislated and real-world driving cycles." *Fuel*, no. 88 (2009): 1608-1617.
- Freedman, B., E.H. Pryde, and T.L. Mounts. "Variables affecting the yields of fatty esters from transesterified vegetable oils." *JAOCS*, no. 61 (1984): 1638-43.
- Freedman, B., R.O Butterfield, and E.H. Pryde. "Transesterification kinetics of soybean oil." *JAOCS*, no. 63 (1986): 1375-1380.
- Gerpen, Jon Van. "Biodiesel processing and production." no. 86 (2005): 1097-1107.
- Graboski, Michael S, and Robert L. McCormick. "Combustion of fat and vegetable oil derived fuels in diesel engines." *Prog. Energy Combust. Sci.*, no. 24 (1998): 125-164.
- Gustone, Frank D. *The chemistry of oils and fats*. Dundee: Blackwell, 2004.
- Hamasaki, K., E. Kinoshita, S. Tajima, K. Takasaki, and D. Morita. "Combustion characteristics of diesel engines with waste vegetable oil methyl ester." *The 5th International Symposium on Diagnostics and Modeling of Combustion in Internal Combustion Engines*. 2001.
- Hamelinck, Carlo, Sigurd Schober, Martin Mittelbach, Julien Verolet, and Bart Dehue. "BIOScopes-fatty acid ethyl esters." *Biodiesel Improvement On Standards, Coordination of Producers and Ethanol Studies*, 2007.
- Haşimoğlu, Can, Murat Ciniviz, İbrahim Özsert, Yakup İçingür, Adnan Parlak, and M. Sahir Salman. "Performance characteristics of a low heat rejection diesel engine operating with biodiesel." *Renewable Energy*, no. 33 (2008): 1709-1715.
- He, Chao, et al. "Comparison of carbonyl compounds emissions from diesel engine fueled with biodiesel and diesel." *Atmospheric Environment*, no. 43 (2009): 3657-3661.
- Heywood, John B. *Internal Combustion Engine Fundamentals*. Singapore: McGraw-Hill, 1988.

- Hoekmana, S. Kent, Amber Broch, Curtis Robbins, Eric Cenicerros, and Mani Natarajan. "Review of biodiesel composition, properties, and specifications." *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, no. 16 (2012): 143-169.
- Hsu, Hwei P. Sinyaller ve sistemler. Çeviren Veysel Silindir, Hasan Dağ, Erkan Afacan, & M.Timur Aydemir. McGraw-Hill / Schaum's Outlines, 1995.
- İlhan, Ali İhsan, Cihan Dündar, Nezahat Öz, ve Hülya Kılınç. «Hava kirliliği ve asit yağmurlarının çevre ve insan sağlığı üzerine etkileri.» TC Orman ve Su İşleri Bakanlığı, 2013.
- Jain, Siddharth, and M. P Sharma. "Stability of biodiesel and its blends: A review." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* , no. 14 (2010): 667–678.
- Jing, Guo-Xi, and Zhi-Yong Hao. "A new technique based on traditional wavelet transform used in NVH application of internal combustion engine." *Mechanical Systems and Signal Processing*, no. 23 (2009): 979-985.
- Karhale, S.S., R.G . Nadre, D.K. Das, and S.K. Dash. "Studies on comparative performance of a compression ignition engine with different blends of biodiesel and diesel under varying operating conditions." *Karnataka Journal of Agricultural Sciences*,, 2008.
- Karmakar, Aninidita, Subrata Karmakar, and Souti Mukherjee. "Properties of various plants and animals feedstocks for biodiesel production." *Bioresource Technology*, no. 101 (2010): 7201-7210.
- Knothe, Gerhard. "Dependence of biodiesel fuel properties on the structure of fatty acid alkyl esters." *Fuel Processing Technology*, no. 86 (2005): 1059-1070.
- Knothe, Gerhard. "Historical perspectives on vegetable oil-based diesel fuels." Dec 2009.
- Knothe, Gerhard, and Kevin R Steidley. "Kinematic viscosity of biodiesel components (fatty acid alkyl esters) and related compounds at low temperatures." *Fuel*, no. 86 (2007): 2560-2567.
- Knothe, Gerhard, Andrew C Matheaus, and Thomas W Ryan III. "Cetane numbers of branched and straight-chain fatty esters determined in a ignition quality tester." *Fuel*, no. 82 (2003): 971-975.
- Kolsarıcı, Özer, Atilla Gür, Dilek Başalma, M. Demir Kaya, ve Necmi İşler. «Yağlı tohumlu bitkiler üretimi.» VI. Türkiye Ziraat Mühendisliği Teknik Kongresi. Ankara, 2005. 3-7.
- Ladommatos, Nicos, Mohammad Parsi, and Angela Knowles. "The effect of fuel cetane improver on diesel pollutant emissions." no. 1 (1996).
- Lapuerta, Magin, Octavia Armas, ve Jose Rodriguez-Fernandez. «Effect of biodiesel fuels on diesel engine emissions.» *Progress in Energy and Combustion Science*, no. 34 (2008): 198–223.
- Lin, Chergng Yuan, and Hsiu An Lin. "Engine performance and emission characteristics of a three-phase emulsion of biodiesel produced by peroxidation." *Fuel Processing Technology*, no. 88 (2007b): 35-41.
- Lin, Chergng Yuan, and Shiou An Lin. "Effects of emulsification variables on fuel properties of two- and three-phase biodiesel emulsions." no. 86 (2007a): 210-217.
- Lin, Chergng-Yuan, and Hsiu-An Lin. "Effects of NOx-inhibitor agent on fuel properties of three-phase biodiesel emulsions." *Fuel Processing Technology*, no. 89 (2008): 1237-1242.
- Lin, Chergng-Yuan, Hsiu-An Lin, and Lang-Bang Hung. "Fuel structure and properties of biodiesel produced by the peroxidation process." no. 85 (2006): 1743-1749.

- Ma, Fangrui, and Milford A. Hanna. "Biodiesel production: a review." *Bioresource Technology*, no. 70 (1999): 1-15.
- Mofijur, M., et al. "Effect of biodiesel from various feedstocks on combustion characteristics, engine durability and materials compatibility: A review." *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, no. 28 (2013): 441-455.
- Nascimento, Marco A.R., et al. "Biodiesel fuel in diesel micro-turbine engines: Modelling and experimental evaluation." *Energy*, no. 33 (2008): 233-240.
- Oppenheim, Alan V., Alan S. Willsky, and S. Hamid Nawab. *Signals & Systems*. 2. Prentice Hall, 1997.
- Ozdemir, Feramuz, and İbrahim Akıncı. "Physical and nutritional properties of four major commercial Turkish hazelnut varieties." *Journal of Food Engineering*, no. 63 (2004): 341-347.
- Öğüt, Hüseyin, ve Hidayet Oğuz. *Biyodizel Üçüncü Mülenyum Yakıtı*. 2. Ankara: Nobel Yayın Dağıtım, 2006.
- Öz, İsmail Hakkı, Oğuz Borat, ve Ali Sürmen. *İçten yanmalı motorlar*. İstanbul: Birsen Yayınevi, 2003.
- Peterson, C.L., D.L. Auld, and R.A. Korus. "Winter rape oil fuel for diesel engines: Recovery and utilization." 1983.
- Piloto-Rodríguez, Ramón, Yisel Sánchez-Borroto, Magin Lapuerta, Leonardo Goyos-Pérez, and Sebastian Verhelst. "Prediction of the cetane number of biodiesel using artificial neural networks and multiple linear regression." *Energy Conversion and Management*, no. 6 (2013): 255-261.
- Pramanik, K. "Properties and use of jatropha curcas oil and diesel fuel blends in compression ignition engine." no. 28 (2003): 239-248.
- Prasads, MV, and M. Krishna. "Performance evaluation of non-edible vegetable oil as substitute fuel in LHR engine." *SAE*, 2014.
- Proakis, John G., ve Dimitris G. Manolakis. *Sayısal sinyal işleme ilkeler, algoritmalar ve uygulamalar*. Çeviren Özgül Salor, Abdurrahman Karamancıoğlu, Nurhan Karabğa, Halis Altun, & Remzi Yıldırım. Nobel, 2010.
- Pryde, E.H. "Vegetable oil as diesel fuel." *Overview*. *JAOCs* 60, 1983: 1557-1558.
- Rajasekar, E., A. Murugesan, R. Subramanian, and N. Nedunchezian. "Review of NOx reduction technologies in CI engines fuelled with oxygenated biomass fuels." *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2010: 2113-2121.
- Ramachandran, K., T. Suganya, N. Nagendra Gandhi, and S. Renganathan. "Recent developments for biodiesel production by ultrasonic assist transesterification using different heterogeneous catalyst: A review." *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, no. 22 (2013): 410-418.
- Ramadhas, A.S., S. Jayaraj, and C. Muraleedharan. "Use of vegetable oils as I.C. engine fuels: A review." no. 29 (2004): 727-742.
- Safgönül, Behçet, Metin Ergeneman, Ertuğrul Arslan, ve Cem Soruşbay. *İçten yanmalı motorlar*. İstanbul: Birsen Yayınevi, 2008.
- Sahoo, P.K., L.M. Das, M.K.G. Babu, V.P. Singh, N.R. Kumar, and T.S. Varyani. "Comparative evaluation of performance and emission characteristics of jatropha, karanja and polanga based biodiesel as fuel in a tractor engine." *Fuel*, no. 88 (2009): 1698-1707.

- Sen, A.K., G. Litak, B.-F. Yao, and G.-X. Li. "Analysis of pressure fluctuations in a natural gas engine under lean burn conditions." *Applied Thermal Engineering*, no. 30 (2010): 776-779.
- Sen, Asok K., Gabriel M. Filippelli, and Jose-Abel Flores. "An application of wavelet analysis to paleoproductivity records from the Southern Ocean." *Computers & Geosciences*, no. 35 (2009): 1445-1450.
- Sen, Asok K., Grzegorz Litak, Rodolfo Taccani, and Robert Radu. "Wavelet analysis of cycle-to-cycle pressure variations in an internal combustion engine." *Chaos, Solitons and Fractals*, no. 38 (2008a): 886-893.
- Sen, Asok K., Jianjun Zheng, and Zuohua Huang. "Dynamics of cycle-to-cycle variations in a natural gas direct-injection spark-ignition engine." *Applied Energy*, no. 88 (2011): 2324-2334.
- Sen, Asok K., Rafal Longwic, Grzegorz Litak, and Krzysztof Gorski. "Analysis of cycle-to-cycle pressure oscillations in a diesel engine." *Mechanical Systems and Signal Processing*, no. 22 (2008b): 362-373.
- Sen, Asok K., Sudhir K. Ash, Bin Huang, and Zuohua Huang. "Effect of exhaust gas recirculation on the cycle-to-cycle variations in a natural gas spark ignition engine." *Applied Thermal Engineering*, 2011: 2247-2253.
- Silvico, C.A, R. Carlos, V.G. Marious, S.R. Leonardodos, and F. Guilherme. "Performance of a diesel generator fueled with palm oil." *Journal of Fuels*, no. 81 (2002): 2097-102.
- Srivastava, Anjana, and Ram Prasad. "Triglycerides-based diesel fuels." *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, no. 4 (2000): 111-133.
- Torrence, Christopher, and Gilbert P. Compo. "A practical guide to wavelet analysis." *Bulletin of the American Meteorological Society* 1 (January 1998).
- Tyson, K.S., and R.L. McCormick. *Biomass biodiesel handling and use guidelines*. Golden: National Technical Information Service, 2006.
- Valens, C. "A really friendly guide to wavelets." 1999.
- Wu, Fujia, Jianxin Wang, Wenmiao Chen, and Shijin Shuai. "A study on emission performance of a diesel engine fueled with five typical methyl ester biodiesels." *Atmospheric Environment*, no. 43 (2009): 1481-1485.
- Wu, Jian-Da, and Jien-Chen Chen. "Continuous wavelet transform technique for fault signal diagnosis of internal combustion engines." *NDT&E International*, no. 39 (2006): 304-311.
- Xue, Jinlin, Tony E. Grift, and Alan C. Hansen. "Effect of biodiesel on engine performances and emissions." *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, no. 15 (2011): 1098-1116.
- Yücesu, Hüseyin Serdar, and Cumali İlkiliç. "Effect of cotton seed oil methyl ester on the performance and exhaust emission of a diesel engine." *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, no. 28:4 (November 2013): 389-398.
- Zhang, Zhihua, and John Moore. "Intrinsic feature extraction in the COI of wavelet power spectra of climatic signals." *4th International Congress on Image and Signal Processing*. 2011. 2380-2383.

EKLER

EK-1

 	09.01.2014 OMV Petrol Ofisi A.Ş. Etili Büyükdere Caddesi No:23 Maslak 34398 İstanbul T 0212 329 15 00 F 0212 329 18 88
İlgili makama, OMV Petrol Ofisi A.Ş. terminali müdürlüklerinde depolanan ve pazarlanan ürünlerin (Kurşunsuz Benzin 95 Oktan, Katkılı Kurşunsuz Benzin 95 Oktan, Motorin*, Fuel-Oil**, Kalorifer Yakıtı, Gazyağı) -TS EN, -EPDK tarafından belirlenen teknik özellikler ve kriterler, -varsa Türkiye Tüpraş şartname değerlerine göre uygunluğunu beyan ederiz. *Motorin: Düşük kükürtü dizel yakıdır. OMV Petrol Ofisi'nin satışı yapmakta olduğu Yeni Prodizel ve Yeni Nesil VMAX Eurodizel max. 10 mg/kg kükürt ihtiva etmektedir. **Fuel-Oil: Maksimum %1 kükürt ihtiva etmektedir. Bilgilerinize arz ederiz. Saygılarımızla,  Mert Dönder Akaryakıt Ürün ve Teknik Hizmetler Uzmanı  Mine Fırar Akaryakıt Ürün, Regülasyon ve OEM İş Geliştirme Müdürü EK-1: Motorin Ürün Özellikleri EK-2: Gazyağı Ürün Özellikleri EK-3: Benzin Ürün Özellikleri EK-4: Fuel Oil Ürün Özellikleri EK-5: Kalorifer Yakıtı Ürün Özellikleri	

ÖZGEÇMİŞ

1981 yılında Erzurum’da doğdu. İlk, orta ve lise tahsilini Erzurum’da tamamladı. 1999 yılında girdiği Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü’nden 2003 yılında mezun oldu. Aynı yıl başladığı yüksek lisans eğitimini 2007 yılında Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü’nde tamamladı. 2009 yılında Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde doktora eğitimine başladı. 2004-2006 tarihleri arasında Erbay İnşaat Ltd.Şti firmasında ve 2006-2010 tarihleri arasında Kara Kuvvetleri Komutanlığı 55’inci Bakım Merkezi Komutanlığı’nda Makine Mühendisi unvanıyla görev yaptı. Şubat 2010 tarihinden itibaren Bayburt Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü’nde Araştırma Görevlisi olarak çalışmaktadır.