

**TRANSESTERİFİKASYON YÖNTEMİYLE  
ÜRETİLEN BİYODİZEL YAKITLARININ ÜZERİNE  
MnO<sub>2</sub>, DODEKANOL, PROPİLEN GLİKOL KATKI  
MADDELERİNİN ETKİSİNİN DENEYSEL OLARAK  
ARAŞTIRILMASI**

**Mahmut UYAR**

**Yüksek Lisans Tezi  
Makine Eğitimi Anabilim Dalı  
Danışman: Doç. Dr. Hanbey HAZAR**

**MAYIS- 2013**

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

**TRANSESTERİFİKASYON YÖNTEMİYLE ÜRETİLEN BİYODİZEL  
YAKITLARININ ÜZERİNE  $MnO_2$ , DODEKANOL, PROPİLEN GLİKOL KATKI  
MADDELERİNİN ETKİSİNİN DENEYSEL OLARAK ARAŞTIRILMASI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Mahmut UYAR**

**(092119102)**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih:**

**Tezin Savunulduğu Tarih:**

**Tez Danışmanı: Doç. Dr. Hanbey HAZAR**

**Diğer Jüri Üyeleri: Yrd. Doç. Dr. İlyas SOMUNKIRAN**

**Yrd. Doç. Dr. Aydın DİKİCİ**

**MAYIS-2013**

## **ÖNSÖZ**

Bu tez çalışmasının her aşamasında katkıları olan hocam Sayın Doç. Dr. Hanbey HAZAR'a saygılarımı sunar, teşekkürü bir borç bilirim. Yakıtların hazırlanma aşamasındaki çalışmalarında yardımlarını esirgemeyen Siirt Üniversitesi Kimya Bölümü, bölüm başkanı Yrd. Doç.Dr. Hacı BAYKARA teşekkür ederim. Motor performans ve emisyon deneylerimin gerçekleşmesinde atölye imkanı hususunda destek olan Batman Üniversitesinin tüm personeline teşekkür ederim. Tez izleme komitesindeki değerli hocalarıma teşekkürü bir borç bilir, saygılarımı sunarım. Maddi ve manevi desteklerini hiç eksik etmeyen ve fazlasıyla ilgi ve yardımlarını gördüğüm aileme sevgilerimi sunar, teşekkür ederim.

**Mahmut UYAR**

**ELAZIĞ - 2013**

## İÇİNDEKİLER

|                                                                          |      |
|--------------------------------------------------------------------------|------|
| ÖNSÖZ .....                                                              | III  |
| İÇİNDEKİLER .....                                                        | IV   |
| ÖZET .....                                                               | IX   |
| SUMMARY .....                                                            | X    |
| ŞEKİLLER LİSTESİ .....                                                   | XI   |
| TABLolar LİSTESİ .....                                                   | XIII |
| KISALTMALAR .....                                                        | XVI  |
| SEMBOLLER LİSTESİ .....                                                  | XVII |
| 1. GİRİŞ .....                                                           | 1    |
| 2. DİZEL MOTOR YAKITLARI ve SINIFLANDIRILMASI.....                       | 5    |
| 2.1. Dizel Yakıtı.....                                                   | 5    |
| 2.2.Dizel Yakıtının Kimyasal ve Fiziksel Özelliklerinin İncelenmesi..... | 6    |
| 2.2.1. Viskozite.....                                                    | 6    |
| 2.2.2. Yoğunluk.....                                                     | 6    |
| 2.2.3. Akma Noktası.....                                                 | 6    |
| 2.2.4. Bulutlanma Noktası.....                                           | 7    |
| 2.2.5. Donma Noktası.....                                                | 7    |
| 2.2.6. Isıl Değer.....                                                   | 7    |
| 2.2.7. Parlama Noktası.....                                              | 8    |
| 2.2.8. Setan Sayısı.....                                                 | 8    |
| 2.2.9. Uçuculuk.....                                                     | 9    |
| 2.2.10. Su ve Tortu Miktarı.....                                         | 9    |
| 2.2.11. Kül.....                                                         | 9    |
| 2.2.12. Kükürt.....                                                      | 9    |
| 2.2.13. Bakır Şerit Korozyon.....                                        | 10   |
| 2.2.14. Karbon Kalıntısı.....                                            | 10   |
| 2.3. Biyodizel Yakıtı.....                                               | 10   |
| 2.4. Dünyada Biyodizel Üretimi.....                                      | 12   |
| 2.4.1. Dünya Ülkelerinde Biyodizel Mevzuatları.....                      | 13   |
| 2.4.2. Ülkemizde Biyodizel.....                                          | 15   |

|                                                                           |    |
|---------------------------------------------------------------------------|----|
| 2.5. Biyodizel Üretim Yöntemleri.....                                     | 15 |
| 2.6. Biyodizelin Transesterifikasyon Reaksiyonu ile Üretim Aşamaları..... | 16 |
| 2.6.1. Alkol ve Katalizörün Karıştırılması.....                           | 17 |
| 2.6.2. Reaksiyon.....                                                     | 17 |
| 2.6.3. Ayırma.....                                                        | 17 |
| 2.6.4. Alkolün Uzaklaştırılması.....                                      | 17 |
| 2.6.5. Gliserin Nötralizasyonu.....                                       | 18 |
| 2.6.6. Metil Ester Yıkama İşlemi.....                                     | 18 |
| 2.7. Biyodizel Üretiminde Dikkat Edilecek Hususlar.....                   | 18 |
| 2.8. Transesterifikasyon Reaksiyonuna Etki Eden Faktörler.....            | 19 |
| 2.8.1. Reaksiyon Sıcaklığının Etkisi.....                                 | 19 |
| 2.8.2. Alkol/Yağ Molar Oranının Etkisi.....                               | 19 |
| 2.8.3. Katalizör Cinsi ve Miktarının Etkisi.....                          | 20 |
| 2.8.4. Serbest Yağ Asitleri ve Suyun Etkisi.....                          | 20 |
| 2.8.5. Reaksiyon Süresinin Etkisi.....                                    | 20 |
| 2.8.6. Alkol Cinsi ve Miktarının Etkisi.....                              | 21 |
| 2.9. Biyodizelin Özellikleri.....                                         | 21 |
| 2.9.1. Soğukta Akış Özellikleri.....                                      | 23 |
| 2.9.2. Toksin Etki.....                                                   | 23 |
| 2.9.3. Biyolojik Olarak Bozunabilirlik.....                               | 23 |
| 2.9.4. Depolama.....                                                      | 23 |
| 3. BİYODİZEL YAKITLARININ HAZIRLANMASI.....                               | 25 |
| 3.1. Çalışmada Kullanılan Yağlar ve Özellikleri.....                      | 25 |
| 3.1.1. Üzüm Çekirdeği Yağı.....                                           | 25 |
| 3.1.2. Ceviz Yağı.....                                                    | 26 |
| 3.1.3. Kayısı Çekirdeği Yağı.....                                         | 26 |
| 3.1.4. Atık Ayçiçeği Yağı.....                                            | 27 |
| 3.1.5. Haşhaş Yağı.....                                                   | 27 |
| 3.2. Yağ Asit Kompozisyonu.....                                           | 27 |
| 3.2. Yağlardaki Serbest Yağ Asiti Tayini.....                             | 29 |
| 3.3. Yağdaki Nemin Uzaklaştırılması.....                                  | 30 |
| 3.4. Metil Esterlerin Hazırlanması.....                                   | 31 |
| 3.4.1. Üzüm Çekirdeği Yağı Metil Esterinin Hazırlanması.....              | 31 |

|                                                                                                     |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 3.4.2. Atık Ayçiçeği Yağı Metil Esterinin Hazırlanması.....                                         | 33 |
| 3.4.3. Haşhaş Yağı Metil Esterinin Hazırlanması.....                                                | 33 |
| 3.4.4. Kayısı Çekirdeği Yağı Metil Esterinin Hazırlanması.....                                      | 34 |
| 3.4.5. Ceviz Yağı Metil Esterinin Hazırlanması.....                                                 | 36 |
| 3.5. Test Yakıtlarının Hazırlanması.....                                                            | 38 |
| 3.6. Yakıt Katkılarının Özelliklerinin İncelenmesi.....                                             | 39 |
| 3.6.1. Manganın Katkı Maddesi Olarak İncelenmesi.....                                               | 39 |
| 3.6.2. Propilen Glikolün Katkı Maddesi Olarak İncelenmesi.....                                      | 41 |
| 3.6.3. Dodekanolün Katkı Maddesi Olarak Kullanımının İncelenmesi.....                               | 41 |
| 3.7. Katkılı Karışımların Hazırlanması.....                                                         | 42 |
| 3.8. Yakıt Özelliklerinin Kimyasal Analizleri.....                                                  | 44 |
| 4. MOTOR TEST MATERYALLERİ VE METOTLAR.....                                                         | 46 |
| 4.1. Deney Seti.....                                                                                | 46 |
| 4.1.1. Egzoz Emisyon Ölçüm Cihazı.....                                                              | 48 |
| 4.1.2. Duman Ölçüm Cihazı.....                                                                      | 49 |
| 4.1.3. Egzoz Gazı Sıcaklık Ölçümü.....                                                              | 50 |
| 4.2. Yöntem.....                                                                                    | 50 |
| 5. DENEYSEL BULGULAR VE TARTIŞMA.....                                                               | 52 |
| 5.1. ÜÇYME İçin Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi.....                                           | 52 |
| 5.1.1. ÜÇYME İçerikli Yakıt Numunelerinin Özgül Yakıt Tüketimi Analizi.....                         | 52 |
| 5.1.2. ÜÇYME İçerikli Yakıt Numunelerinin NO <sub>x</sub> Emisyonları Analizi.....                  | 55 |
| 5.1.3. ÜÇYME İçerikli Yakıt Numunelerinin Karbon monoksit (CO) Emisyonları Analizi.....             | 58 |
| 5.1.4. ÜÇYME İçerikli Yakıt Numunelerinin Hidrokarbon (HC) Emisyonları Analizi.....                 | 60 |
| 5.1.5. ÜÇYME İçerikli Yakıt Numunelerinin Karbondioksit (CO <sub>2</sub> ) Emisyonları Analizi..... | 62 |
| 5.1.6. ÜÇYME Yakıt Numunelerinin Oksijen (O <sub>2</sub> ) Emisyonları Analizi.....                 | 64 |
| 5.1.7. ÜÇYME İçerikli Yakıt Numunelerinin Duman (İs) Emisyonları Analizi.....                       | 66 |
| 5.1.8. ÜÇYME İçerikli Yakıt Numunelerinin Egzoz Gazları Sıcaklık Analizi.....                       | 67 |
| 5.2. KÇYME İçin Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi.....                                           | 70 |
| 5.2.1. KÇYME İçerikli Yakıt Numunelerinin Özgül Yakıt Tüketimi Analizi.....                         | 70 |
| 5.2.2. KÇYME İçerikli Yakıt Numunelerinin NO <sub>x</sub> Emisyonları Analizi.....                  | 73 |
| 5.2.3. KÇYME İçerikli Yakıt Numunelerinin Karbon monoksit (CO) Emisyonları Analizi.....             | 75 |

|                                                                                                        |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 5.2.4. KÇYME İçerikli Yakıt Numunelerinin Hidrokarbon (HC) Emisyonları Analizi.....                    | 77  |
| 5.2.5. KÇYME İçerikli Yakıt Numunelerinin Karbondioksit (CO <sub>2</sub> ) Emisyonları Analizi..       | 80  |
| 5.2.6. KÇYME Yakıt Numunelerinin Oksijen (O <sub>2</sub> ) Emisyonları Analizi.....                    | 81  |
| 5.2.7. KÇYME İçerikli Yakıt Numunelerinin Duman (İs) Emisyonları Analizi.....                          | 83  |
| 5.2.8. KÇYME İçerikli Yakıt Numunelerinin Egzoz Gazları Sıcaklık Analizi.....                          | 85  |
| 5.3. HYME İçin Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi.....                                               | 88  |
| 5.3.1. HYME İçerikli Yakıt Numunelerinin Özgül Yakıt Tüketimi Analizi.....                             | 88  |
| 5.3.2. HYME İçerikli Yakıt Numunelerinin NO <sub>x</sub> Emisyonları Analizi.....                      | 91  |
| 5.3.3. HYME İçerikli Yakıt Numunelerinin Karbon monoksit (CO) Emisyonları<br>Analizi.....              | 93  |
| 5.3.4. HYME İçerikli Yakıt Numunelerinin Hidrokarbon (HC) Emisyonları Analizi.....                     | 95  |
| 5.3.5. HYME İçerikli Yakıt Numunelerinin Karbondioksit (CO <sub>2</sub> ) Emisyonları Analizi....      | 97  |
| 5.3.6. HYME Yakıt Numunelerinin Oksijen (O <sub>2</sub> ) Emisyonları Analizi.....                     | 99  |
| 5.3.7. HYME İçerikli Yakıt Numunelerinin Duman (İs) Emisyonları Analizi.....                           | 101 |
| 5.3.8. HYME İçerikli Yakıt Numunelerinin Egzoz Gazları Sıcaklık Analizi.....                           | 103 |
| 5.4. CYME İçin Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi.....                                               | 106 |
| 5.4.1. CYME İçerikli Yakıt Numunelerinin Özgül Yakıt Tüketimi Analizi.....                             | 106 |
| 5.4.2. CYME İçerikli Yakıt Numunelerinin NO <sub>x</sub> Emisyonları Analizi.....                      | 109 |
| 5.4.3. CYME İçerikli Yakıt Numunelerinin Karbon monoksit (CO) Emisyonları<br>Analizi.....              | 111 |
| 5.4.4. CYME İçerikli Yakıt Numunelerinin Hidrokarbon (HC) Emisyonları Analizi.....                     | 113 |
| 5.4.5. CYME İçerikli Yakıt Numunelerinin Karbondioksit (CO <sub>2</sub> ) Emisyonları Analizi...       | 115 |
| 5.4.6. CYME Yakıt Numunelerinin Oksijen (O <sub>2</sub> ) Emisyonları Analizi.....                     | 117 |
| 5.4.7. CYME İçerikli Yakıt Numunelerinin Duman (İs) Emisyonları Analizi.....                           | 119 |
| 5.4.8. CYME İçerikli Yakıt Numunelerinin Egzoz Gazları Sıcaklık Analizi.....                           | 121 |
| 5.5. AAYME İçin Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi.....                                              | 124 |
| 5.5.1. AAYME İçerikli Yakıt Numunelerinin Özgül Yakıt Tüketimi Analizi.....                            | 124 |
| 5.5.2. AAYME İçerikli Yakıt Numunelerinin NO <sub>x</sub> Emisyonları Analizi.....                     | 127 |
| 5.5.3. AAYME İçerikli Yakıt Numunelerinin Karbon monoksit (CO) Emisyonları<br>Analizi.....             | 129 |
| 5.5.4. AAYME İçerikli Yakıt Numunelerinin Hidrokarbon (HC) Emisyonları Analizi...                      | 131 |
| 5.5.5. AAYME İçerikli Yakıt Numunelerinin Karbondioksit (CO <sub>2</sub> ) Emisyonları<br>Analizi..... | 133 |

|                                                                                                                 |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 5.5.6. AAYME Yakıt Numunelerinin Oksijen (O <sub>2</sub> ) Emisyonları Analizi.....                             | 135 |
| 5.5.7. AAYME İçerikli Yakıt Numunelerinin Duman (İs) Emisyonları Analizi.....                                   | 137 |
| 5.5.8. AAYME İçerikli Yakıt Numunelerinin Egzoz Gazları Sıcaklık Analizi.....                                   | 139 |
| 5.6. 100 Saatlik Motor Testlerinin Değerlendirilmesi.....                                                       | 142 |
| 5.6.1. Biyodizel ve dizel Yakıtı Kullanılan Motorların, Parçaları Üzerindeki birikintilerin incelenmesi.....    | 143 |
| 5.6.1.1. Dizel Yakıtı ile 100 saat Çalışma Sonunda Motor Parçaları üzerindeki birikintinin incelenmesi.....     | 144 |
| 5.6.1.2. Biyodizel Yakıtı ile 100 saat Çalışma Sonunda Motor Parçaları üzerindeki birikintinin incelenmesi..... | 147 |
| 5.6.2. Biyodizel Yakıtı Kullanılan Motorların, Yağlama Yağının İncelenmesi.....                                 | 151 |
| 5.6.3. Motor parçalarına ait numunelerin Üzerindeki Mikro Yapının SEM ve EDS analizi.....                       | 153 |
| 5.6.3.1. SEM (Scanning Elektron Microscopy) analizleri.....                                                     | 154 |
| 5.6.3.1.1. B50 ve dizel yakıtı ile çalışan motorların pistonları üzerindeki SEM analizleri.....                 | 155 |
| 5.6.3.1.2. B50 ve dizel yakıtı ile çalışan motorların silindir gömleği üzerindeki SEM analizleri.....           | 156 |
| 5.6.3.1.3. B50 ve dizel yakıtı ile çalışan motorların segmanları üzerindeki SEM analizleri.....                 | 157 |
| 5.6.3.2. EDS (Energy Dispersive Spectrograf) analizleri.....                                                    | 159 |
| 5.6.3.2.1 B50 ve dizel yakıtı ile çalışan motorların pistonları üzerindeki EDS analizleri.....                  | 159 |
| 5.6.3.2.2. B50 ve dizel yakıtı ile çalışan motorların silindir gömlekleri üzerindeki EDS analizleri.....        | 161 |
| 6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....                                                                                    | 163 |
| 7. ÖNERİLER.....                                                                                                | 176 |
| KAYNAKÇA.....                                                                                                   | 177 |
| ÖZGEÇMİŞ.....                                                                                                   | 182 |

## ÖZET

Bu çalışmada, asit ve baz katalizörlü transesterifikasyon reaksiyonu uygulanarak, farklı özelliklere sahip yağlardan, biyodizel üretilmiştir. Yakıtların elde edilen bu değerlerinin TS-EN 14214 otomotiv yakıtları standartlarına uygun olduğu görülmüştür. Biyodizeller saf olarak (B100) ve dizel yakıt ile karıştırılarak (B20, B35, B50, B75) direk püskürtmeli üç silindirli bir dizel motorunda yakıt olarak kullanılıp, motor performans karakteristikleri ile egzoz emisyonu değişimleri dizel yakıtı ile karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Bu çalışmanın diğer bir çıkış noktası ise, biyodizel yakıtlarının B50'si üzerine ilave edilen Mn, dodekanol ve propilen glikol katkı maddelerinin, bir dizel motordaki, performans ve emisyon değerlerindeki değişimi incelemektir.

Deneysel sonuçlara göre; biyodizel ve karışımlarının dizel yakıtı ile genel olarak benzer özellikler göstermiştir. Yakıt numunelerinde biyodizel oranının artmasıyla beraber özgül yakıt tüketiminde ve egzoz çıkış sıcaklığında artış görülmüştür. Biyodizel kullanımında dizel yakıtı kıyasla; CO, HC, duman emisyonlarında düşüş, NO<sub>x</sub>, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> artış gözlemlenmiştir. B50 yakıtlarına ilave edilen katkı maddeleri ile yapılan çalışmada ise, duman, CO, HC, NO<sub>x</sub> ve özgül yakıt tüketiminde düşüş, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> artış sağlandığı görülmüştür. Test işlemlerinin sonucunda, tüm biyodizeller için B20 yakıtının, diğer numunelere kıyasla daha iyi bir performans sergilediği, katkılı çalışmada ise, en uygun katkı ilave oranı, CYME için 20Mnµmol/l+PG, diğer biyodizeller için ise yaklaşık 40Mnµmol/l+PG ölçeğindeki kullanımlarda sağlanmıştır. Biyodizel yakıtının yağlama özelliğinin dizel yakıtına göre daha iyi olması motor parçaları üzerinde aşınma yönünde olumlu bir davranış olarak düşünülmektedir.

Yapılan kısa ve uzun süreli motor testleri sonuçlarına dayanarak biyodizel ve karışım yakıtlarının direk püskürtmeli dizel motorlarda motor yapısında hiçbir değişiklik yapılmadan kullanılabileceği sonucuna varılmıştır. Ayrıca hava kirliliğinin azaltılması açısından dizel motorlar için uygun bir alternatif yakıt olmaktadır.

**Anahtar kelimeler:** Dizel Motor, Biyodizel, Mn, Propilen Glikol, Dodekanol

## SUMMARY

### EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE EFFECT OF $\text{MnO}_2$ , DODECANOL, PROPYLENE, GLYCOL ADDITIVES ON BIODIESEL FUELS MANUFACTURED WITH THE TRANS-ESTERIFICATION METHOD

In this study, biodiesel is produced from oils that have different characteristics applying the trans-esterification of acid and base catalyzed. It is seen that to be appropriate for the TS-EN 14214 standards these values obtained from fuels. Biodiesels, which as pure (B100) and mixed with diesel fuel (B20, B35, B50 AND B75) are investigated as comparison with diesel fuel of exhaust emission changes with engine performance characteristics, which be used on a three-cylinder direct injection diesel engine. An another interesting point of this study is to examine the change in performance and emission values on a diesel engine of dedekanol and propylene glycol additives that added on B50 of biodiesel fuels.

According to experimental results, biodiesel and its blends showed generally similar characteristics with diesel fuel. It is seen that with the increasing ratio of biodiesel in fuel, specific fuel consumption and exhaust temperature has increased. Compared to diesel fuel in the use of biodiesel, while CO, HC and smoke emissions decrease, NO<sub>x</sub>, CO<sub>2</sub> and O<sub>2</sub> have increased. Also, in the study contain the additives added to B50 fuels, it showed that HC, NO<sub>x</sub> and in specific fuel consumption decrease, in CO<sub>2</sub> and O<sub>2</sub> values to be increasing. As a result of test processing of all biodiesel fuels, B20 fuel displays a better performance than the others samples. Also, in additive study, the optimal ratio of additive; for CYME is 20Mn $\mu\text{mol/l}$ +PG, for the others are biodiesel approximately 40Mn $\mu\text{mol/l}$ +PG, too. Lubricating property of biodiesel fuel is a better case than others diesel fuel. This case is thanked to be a positive effect on the engine parts in the direct of erosion. It is concluded at the results of short and long term engine experiments, biodiesel and its blends can be used in direct injection diesel engines without any modification to substitute diesel fuel. For diesel engines in terms of reducing of air pollution is also an alternative fuel.

**Key words:** Diesel engine, biodiesel, Mn, Propylene Glycol, Dodecanol

## ŞEKİLLER LİSTESİ

### Sayfa No

|                                                                                                                |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 2.1. 2002–2006 yılları arasında Avrupa birliği üye ülkeleri biyodizel üretim değerleri.....              | 12 |
| Şekil 2.2. Biyodizel üretim şeması.....                                                                        | 16 |
| Şekil 2.3. Farklı tip alkol kullanımının reaksiyon zamanına bağlı olarak ester dönüşümü üzerindeki etkisi..... | 21 |
| Şekil 3.1. Serbest yağ asidi tayinindeki titrasyon işlemi.....                                                 | 29 |
| Şekil 3.2. Yağın ve biyodizelin içeriğindeki olası nemin uzaklaştırıldığı buharlaştırma işlemi.....            | 31 |
| Şekil 3.3. Transesterifikasyon reaksiyonu.....                                                                 | 32 |
| Şekil 3.4. Üzüm çekirdeği yağı için; (a) faz ayrışması, (b) yıkama işlemi.....                                 | 33 |
| Şekil 3.5. Haşhaş yağı ve elde edilen haşhaş yağı metil esterleri.....                                         | 34 |
| Şekil 3.6. Kayısı çekirdeği yağı ve elde edilen kayısı çekirdeği yağı metil esterleri.....                     | 36 |
| Şekil 3.7. Ceviz yağı için; (a) faz ayrışması, (b) yıkama işlemi.....                                          | 38 |
| Şekil 3.8. Ceviz yağı ve elde edilen ceviz yağı metil esterleri.....                                           | 38 |
| Şekil 3.9. Üretim sonrası elde edilen metil esterler.....                                                      | 39 |
| Şekil 3.10. Yakıta metal bazlı katkı maddesi ilavesinin donma noktası üzerine etkisi.....                      | 40 |
| Şekil 3.11. Çalışmada kullanılan yakıt katkı maddeleri.....                                                    | 42 |
| Şekil 4.1. Deney düzeneğinin şematik görüntüsü.....                                                            | 47 |
| Şekil 4.2. Deneylerin yapıldığı test düzeneği.....                                                             | 47 |
| Şekil 4.3. Egzoz emisyon ölçüm cihazı.....                                                                     | 48 |
| Şekil 4.4. Çalışmadaki duman ölçüm cihazının görüntüsü.....                                                    | 50 |
| Şekil 4.5. Deneylerde kullanılan kızılötesi termometre.....                                                    | 50 |
| Şekil 5.1. ÜÇYME için hazırlanan yakıt türlerinin ÖYT emisyonlarının değişimi.....                             | 53 |
| Şekil 5.2. ÜÇYME için hazırlanan yakıt türlerinin NO <sub>x</sub> emisyonlarının değişimi.....                 | 56 |
| Şekil 5.3. ÜÇYME için hazırlanan yakıt türlerinin CO emisyonlarının değişimi.....                              | 58 |
| Şekil 5.4. ÜÇYME için hazırlanan yakıt türlerinin HC emisyonlarının değişimi.....                              | 60 |
| Şekil 5.5. ÜÇYME için hazırlanan yakıt türlerinin CO <sub>2</sub> emisyonlarının değişimi.....                 | 62 |
| Şekil 5.6. ÜÇYME için hazırlanan yakıt türlerinin O <sub>2</sub> emisyonlarının değişimi.....                  | 64 |
| Şekil 5.7. ÜÇYME için hazırlanan yakıt türlerinin duman emisyonlarının değişimi.....                           | 66 |
| Şekil 5.8. ÜÇYME için hazırlanan yakıt türlerinin egzoz çıkış sıcaklığı değişimi.....                          | 68 |
| Şekil 5.9. KÇYME için hazırlanan yakıt türlerinin ÖYT emisyonlarının değişimi.....                             | 71 |

|                                                                                                 |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Şekil 5.10. KÇYME için hazırlanan yakıt türlerinin NO <sub>x</sub> emisyonlarının değişimi..... | 74  |
| Şekil 5.11. KÇYME için hazırlanan yakıt türlerinin CO emisyonlarının değişimi.....              | 76  |
| Şekil 5.12. KÇYME için hazırlanan yakıt türlerinin HC emisyonlarının değişimi.....              | 78  |
| Şekil 5.13. KÇYME için hazırlanan yakıt türlerinin CO <sub>2</sub> emisyonlarının değişimi..... | 80  |
| Şekil 5.14. KÇYME için hazırlanan yakıt türlerinin O <sub>2</sub> emisyonlarının değişimi.....  | 82  |
| Şekil 5.15. KÇYME için hazırlanan yakıt türlerinin duman emisyonlarının değişimi.....           | 84  |
| Şekil 5.16. KÇYME için hazırlanan yakıt türlerinin egzoz çıkış sıcaklığı değişimi.....          | 86  |
| Şekil 5.17. HYME için hazırlanan yakıt türlerinin ÖYT emisyonlarının değişimi.....              | 89  |
| Şekil 5.18. HYME için hazırlanan yakıt türlerinin NO <sub>x</sub> emisyonlarının değişimi.....  | 92  |
| Şekil 5.19. HYME için hazırlanan yakıt türlerinin CO emisyonlarının değişimi.....               | 94  |
| Şekil 5.20. HYME için hazırlanan yakıt türlerinin HC emisyonlarının değişimi.....               | 96  |
| Şekil 5.21. HYME için hazırlanan yakıt türlerinin CO <sub>2</sub> emisyonlarının değişimi.....  | 98  |
| Şekil 5.22. HYME için hazırlanan yakıt türlerinin O <sub>2</sub> emisyonlarının değişimi.....   | 100 |
| Şekil 5.23. HYME için hazırlanan yakıt türlerinin duman emisyonlarının değişimi.....            | 102 |
| Şekil 5.24. HYME için hazırlanan yakıt türlerinin egzoz çıkış sıcaklığı değişimi.....           | 104 |
| Şekil 5.25. CYME için hazırlanan yakıt türlerinin ÖYT emisyonlarının değişimi.....              | 107 |
| Şekil 5.26. CYME için hazırlanan yakıt türlerinin NO <sub>x</sub> emisyonlarının değişimi.....  | 110 |
| Şekil 5.27. CYME için hazırlanan yakıt türlerinin CO emisyonlarının değişimi.....               | 112 |
| Şekil 5.28. CYME için hazırlanan yakıt türlerinin HC emisyonlarının değişimi.....               | 114 |
| Şekil 5.29. CYME için hazırlanan yakıt türlerinin CO <sub>2</sub> emisyonlarının değişimi.....  | 116 |
| Şekil 5.30. CYME için hazırlanan yakıt türlerinin O <sub>2</sub> emisyonlarının değişimi.....   | 118 |
| Şekil 5.31. CYME için hazırlanan yakıt türlerinin duman emisyonlarının değişimi.....            | 120 |
| Şekil 5.32. CYME için hazırlanan yakıt türlerinin egzoz çıkış sıcaklığı değişimi.....           | 122 |
| Şekil 5.33. AAYME için hazırlanan yakıt türlerinin ÖYT emisyonlarının değişimi.....             | 125 |
| Şekil 5.34. AAYME için hazırlanan yakıt türlerinin NO <sub>x</sub> emisyonlarının değişimi..... | 128 |
| Şekil 5.35. AAYME için hazırlanan yakıt türlerinin CO emisyonlarının değişimi.....              | 130 |
| Şekil 5.36. AAYME için hazırlanan yakıt türlerinin HC emisyonlarının değişimi.....              | 132 |
| Şekil 5.37. AAYME için hazırlanan yakıt türlerinin CO <sub>2</sub> emisyonlarının değişimi..... | 134 |
| Şekil 5.38. AAYME için hazırlanan yakıt türlerinin O <sub>2</sub> emisyonlarının değişimi.....  | 136 |
| Şekil 5.39. AAYME için hazırlanan yakıt türlerinin duman emisyonlarının değişimi.....           | 138 |
| Şekil 5.40. AAYME için hazırlanan yakıt türlerinin egzoz çıkış sıcaklığı değişimi.....          | 140 |
| Şekil 5.41. Deneylerde kullanılan 6 LD 400 Lombardini marka motorun genel görüntüsü.....        | 143 |

|                                                                                                                                        |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Şekil 5.42. Dizel yakıtı ile çalışma sonrası yakıt enjektör ucunun görünümü.....                                                       | 144 |
| Şekil 5.43. Dizel yakıtı ile çalışma sonrası silindir üst yüzeyinin görünümü.....                                                      | 145 |
| Şekil 5.44. Dizel yakıtı ile çalışma sonrası piston-segman takımının görünümü.....                                                     | 145 |
| Şekil 5.45. Dizel yakıtı ile çalışma sonrası yakıt silindir gömleğinin görünümü.....                                                   | 146 |
| Şekil 5.46. Dizel yakıtı ile çalışma sonrası üst kapağın görünümü.....                                                                 | 146 |
| Şekil 5.47. Dizel yakıtı ile çalışma sonrası supapların görünümü.....                                                                  | 147 |
| Şekil 5.48. B50 yakıtı ile çalışma sonrası yakıt enjektör ucunun görünümü.....                                                         | 148 |
| Şekil 5.49. B50 yakıtı ile çalışma sonrası silindir üst yüzeyinin görünümü.....                                                        | 148 |
| Şekil 5.50. B50 yakıtı ile çalışma sonrası piston-segman takımının görünümü.....                                                       | 149 |
| Şekil 5.51. B50 yakıtı ile çalışma sonrası silindir gömleğinin görünümü.....                                                           | 149 |
| Şekil 5.52. B50 ile çalışma sonrası üst kapağın görünümü.....                                                                          | 150 |
| Şekil 5.53. B50 yakıtı ile çalışma sonrası supapların görünümü.....                                                                    | 150 |
| Şekil 5.54. Zımparalanma işleminin yapıldığı Steruers Dap-7 marka cihaza ait görüntü...                                                | 153 |
| Şekil 5.55. Çuhalama işleminin yapıldığı, Metkon FORCIPOL-1 marka cihaza ait görüntü.....                                              | 154 |
| Şekil 5.56. Dizel ve B50 yakıtı ile çalıştırılmış pistonun X 100 büyültme ile kesiti üzerinden alınan SEM fotoğrafları.....            | 155 |
| Şekil 5.57. Dizel ve B50 yakıtı ile çalıştırılmış pistonun X 200 büyültme ile kesiti üzerinden alınan SEM fotoğrafları.....            | 155 |
| Şekil 5.58. Dizel ve B50 yakıtı ile çalıştırılmış pistonun X 500 büyültme ile kesiti üzerinden alınan SEM fotoğrafları.....            | 156 |
| Şekil 5.59. Dizel ve B50 yakıtı ile çalıştırılmış silindir gömleğinin X 100 büyültme ile kesiti üzerinden alınan SEM fotoğrafları..... | 156 |
| Şekil 5.60. Dizel ve B50 yakıtı ile çalıştırılmış silindir gömleğinin X 200 büyültme ile kesiti üzerinden alınan SEM fotoğrafları..... | 157 |
| Şekil 5.61. Dizel ve B50 yakıtı ile çalıştırılmış segmanın X 100 büyültme ile kesiti üzerinden alınan SEM fotoğrafları.....            | 157 |
| Şekil 5.62. Dizel ve B50 yakıtı ile çalıştırılmış segmanın X 200 büyültme ile kesiti üzerinden alınan SEM fotoğrafları.....            | 158 |
| Şekil 5.63. Dizel ve B50 yakıtı ile çalıştırılmış segmanın X 300 büyültme ile kesiti üzerinden alınan SEM fotoğrafları.....            | 158 |
| Şekil 5.64. Dizel yakıtı ile çalışan piston numunesine ait EDS analiz sonuçları.....                                                   | 159 |
| Şekil 5.65. B50 yakıtı ile çalışan piston numunesine ait EDS analiz sonuçları.....                                                     | 160 |

|                                                                                                |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Şekil 5.66. Dizel yakıtı ile çalışan silindir gömleği numunesine ait EDS analiz sonuçları..... | 161 |
| Şekil 5.67. B50 yakıtı ile çalışan silindir gömleği numunesine ait EDS analiz sonuçları.....   | 162 |

## TABLÖLAR LİSTESİ

### Sayfa No

|                                                                                                         |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tablo 2.1. EN590 dizel yakıtı standartları.....                                                         | 5  |
| Tablo 2.2. TS EN 14214 Otomotiv yakıtlar-yağ asiti metil esteri (Yame /Biyodizel).....                  | 22 |
| Tablo 3.1. Yağ asit kompozisyonu.....                                                                   | 28 |
| Tablo 3.2. Stearik ve oleik asit cinsinden serbest yağ asit oranları.....                               | 30 |
| Tablo 3.3. Hazırlanan yakıt numunelerinin kısaltılmış isimleri ve içerik bilgileri.....                 | 43 |
| Tablo 3.4. Dizel ve biyodizel yakıtlarının fiziksel ve kimyasal özellikleri .....                       | 45 |
| Tablo 4.1. Deney motorunun teknik özellikleri.....                                                      | 46 |
| Tablo 4.2. Deneylerde kullanılan jeneratörün teknik özellikler.....                                     | 48 |
| Tablo 4.3. Egzoz emisyon ölçüm cihazının ölçüm aralığı ve hassasiyet değerleri.....                     | 49 |
| Tablo 4.4. Duman ölçüm cihazı ölçüm aralığı ve hassasiyet değerleri.....                                | 49 |
| Tablo 5.1. ÜÇYME yakıt türlerinin değişken yükteki ÖYT değerleri.....                                   | 53 |
| Tablo 5.2. ÜÇYME yakıt türlerinin değişken yükteki NO <sub>x</sub> değerleri.....                       | 56 |
| Tablo 5.3. ÜÇYME için hazırlanan yakıt türlerinin değişken yükteki CO değerleri.....                    | 58 |
| Tablo 5.4. ÜÇYME için hazırlanan yakıt türlerinin değişken yükteki HC değerleri.....                    | 60 |
| Tablo 5.5. ÜÇYME için hazırlanan yakıt türlerinin değişken yükteki CO <sub>2</sub> değerleri.....       | 62 |
| Tablo 5.6. ÜÇYME yakıt türlerinin değişken yükteki O <sub>2</sub> değerleri.....                        | 64 |
| Tablo 5.7. ÜÇYME için hazırlanan yakıt türlerinin değişken yükteki duman emisyon değerleri.....         | 66 |
| Tablo 5.8. ÜÇYME için hazırlanan yakıt türlerinin değişken yükteki egzoz çıkış sıcaklığı değerleri..... | 68 |
| Tablo 5.9. KÇYME yakıt türlerinin değişken yükteki ÖYT değerleri.....                                   | 70 |
| Tablo 5.10. KÇYME yakıt türlerinin değişken yükteki NO <sub>x</sub> değerleri.....                      | 73 |
| Tablo 5.11. KÇYME için hazırlanan yakıt türlerinin değişken yükteki CO değerleri.....                   | 76 |
| Tablo 5.12. KÇYME için hazırlanan yakıt türlerinin değişken yükteki HC değerleri.....                   | 78 |
| Tablo 5.13. KÇYME için hazırlanan yakıt türlerinin değişken yükteki CO <sub>2</sub> değerleri.....      | 80 |
| Tablo 5.14. KÇYME yakıt türlerinin değişken yükteki O <sub>2</sub> değerleri.....                       | 82 |

|                                                                                                          |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tablo 5.15. KÇYME için hazırlanan yakıt türlerinin değişken yükteki duman emisyon değerleri.....         | 84  |
| Tablo 5.16. KÇYME için hazırlanan yakıt türlerinin değişken yükteki egzoz çıkış sıcaklığı değerleri..... | 86  |
| Tablo 5.17. HYME yakıt türlerinin değişken yükteki ÖYT değerleri.....                                    | 88  |
| Tablo 5.18. HYME yakıt türlerinin değişken yükteki NO <sub>x</sub> değerleri.....                        | 91  |
| Tablo 5.19. HYME için hazırlanan yakıt türlerinin değişken yükteki CO değerleri.....                     | 95  |
| Tablo 5.20. HYME için hazırlanan yakıt türlerinin değişken yükteki HC değerleri.....                     | 96  |
| Tablo 5.21. HYME için hazırlanan yakıt türlerinin değişken yükteki CO <sub>2</sub> değerleri.....        | 98  |
| Tablo 5.22. HYME yakıt türlerinin değişken yükteki O <sub>2</sub> değerleri.....                         | 100 |
| Tablo 5.23. HYME için hazırlanan yakıt türlerinin değişken yükteki duman emisyon değerleri.....          | 102 |
| Tablo 5.24. HYME için hazırlanan yakıt türlerinin değişken yükteki egzoz çıkış sıcaklığı değerleri.....  | 104 |
| Tablo 5.25. CYME yakıt türlerinin değişken yükteki ÖYT değerleri.....                                    | 106 |
| Tablo 5.26. CYME yakıt türlerinin değişken yükteki NO <sub>x</sub> değerleri.....                        | 109 |
| Tablo 5.27. CYME için hazırlanan yakıt türlerinin değişken yükteki CO değerleri.....                     | 112 |
| Tablo 5.28. CYME için hazırlanan yakıt türlerinin değişken yükteki HC değerleri.....                     | 114 |
| Tablo 5.29. CYME için hazırlanan yakıt türlerinin değişken yükteki CO <sub>2</sub> değerleri.....        | 116 |
| Tablo 5.30. CYME yakıt türlerinin değişken yükteki O <sub>2</sub> değerleri.....                         | 118 |
| Tablo 5.31. CYME için hazırlanan yakıt türlerinin değişken yükteki duman emisyon değerleri.....          | 120 |
| Tablo 5.32. CYME için hazırlanan yakıt türlerinin değişken yükteki egzoz çıkış sıcaklığı değerleri.....  | 122 |
| Tablo 5.33. AAYME yakıt türlerinin değişken yükteki ÖYT değerleri.....                                   | 124 |
| Tablo 5.34. AAYME yakıt türlerinin değişken yükteki NO <sub>x</sub> değerleri.....                       | 127 |
| Tablo 5.35. AAYME için hazırlanan yakıt türlerinin değişken yükteki CO değerleri.....                    | 130 |
| Tablo 5.36. AAYME için hazırlanan yakıt türlerinin değişken yükteki HC değerleri.....                    | 132 |
| Tablo 5.37. AAYME için hazırlanan yakıt türlerinin değişken yükteki CO <sub>2</sub> değerleri.....       | 134 |
| Tablo 5.38. AAYME yakıt türlerinin değişken yükteki O <sub>2</sub> değerleri.....                        | 136 |
| Tablo 5.39. AAYME için hazırlanan yakıt türlerinin değişken yükteki duman emisyon değerleri.....         | 138 |

|                                                                                                             |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tablo 5.40. AAYME için hazırlanan yakıt türlerinin değişken yükteki egzoz çıkış sıcaklığı değerleri.....    | 140 |
| Tablo 5.41. Deneylerde kullanılan dizel motorun teknik özellikleri.....                                     | 142 |
| Tablo 5.42. Dizel ve B50 yakıtının 100 saat'lık motor çalışması sonunda motor yağındaki kül oranı.....      | 151 |
| Tablo 5.43. Dizel ve B50 yakıtının 100 saat'lık motor çalışması sonunda motor yağının viskozite değeri..... | 152 |

## KISALTMALAR

|                        |                                                              |
|------------------------|--------------------------------------------------------------|
| <b>ÜÇYME</b>           | : Üzüm Çekirdeği Yağı Metil Esteri                           |
| <b>KÇYME</b>           | : Kayısı Çekirdeği Yağı Metil Esteri                         |
| <b>CYME</b>            | : Ceviz Yağı Metil Esteri                                    |
| <b>HYME</b>            | : Haşhaş Yağı Metil Esteri                                   |
| <b>AAYME</b>           | : Atık Ayçiçeği Yağı Metil Esteri                            |
| <b>DY</b>              | : Dizel Yakıtı                                               |
| <b>B20</b>             | : %20 biyodizel ve %80 dizel yakıtından oluşan karışım yakıt |
| <b>B35</b>             | : %35 biyodizel ve %65 dizel yakıtından oluşan karışım yakıt |
| <b>B50</b>             | : %50 biyodizel ve %50 dizel yakıtından oluşan karışım yakıt |
| <b>B75</b>             | : %75 biyodizel ve %25 dizel yakıtından oluşan karışım yakıt |
| <b>B100</b>            | : %100 biyodizel                                             |
| <b>MnO<sub>2</sub></b> | : Mangan dioksit                                             |
| <b>Mn</b>              | : Mangan                                                     |
| <b>Do</b>              | : Dodekanol                                                  |
| <b>PG</b>              | : Propilen Glikol                                            |
| <b>Ppm</b>             | : Milyondaki Partikül Miktarı                                |
| <b>TG</b>              | : Tutuşma Gecikmesi                                          |
| <b>ÖYT</b>             | : Özgül Yakıt Tüketimi                                       |
| <b>μmol</b>            | : Mikro mol                                                  |
| <b>TG</b>              | : Tutuşma Gecikmesi                                          |
| <b>SYA</b>             | : Serbest Yağ Asiti                                          |
| <b>YAME</b>            | : Yağ Asidi Metil Esteri                                     |
| <b>ÜÖN</b>             | : Üst Ölü Nokta                                              |

## SEMBOLLER LİSTESİ

|                                    |                    |
|------------------------------------|--------------------|
| <b>NO<sub>x</sub></b>              | : Azot Oksitler    |
| <b>CO</b>                          | : Karbon monoksit  |
| <b>NaOH</b>                        | : Sodyum hidroksit |
| <b>HC</b>                          | : Hidrokarbon      |
| <b>Fe</b>                          | : Demir            |
| <b>Pb</b>                          | : Kurşun           |
| <b>Mg</b>                          | : Magnezyum        |
| <b>Ca</b>                          | : Kalsiyum         |
| <b>Cu</b>                          | : Bakır            |
| <b>Ni</b>                          | : Nikel            |
| <b>Mo</b>                          | : Molipten         |
| <b>Kw</b>                          | : Kilowatt         |
| <b>d/dak</b>                       | : Devir/dakika     |
| <b>SS</b>                          | :Setan sayısı      |
| <b>H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub></b> | : Sülfürik Asit    |
| <b>Ce</b>                          | : Seryum           |

## 1. GİRİŞ

Ulaştırma, deniz taşımacılığı, güç üretim tesisleri, tarımsal ve endüstriyel faaliyetlerde dizel motorlar aktif bir şekilde kullanılmaktadır. Bu geniş kullanım alanına sahip dizel motorlarda petrol kökenli yakıtlar kullanılmaktadır. Dünya nüfusundaki artışa ve teknolojinin gelişmesine paralel olarak, petrol sektörünün talebi karşılayamaması ve petrol fiyatlarının aşırı yükselmesi gibi olası bir durumda, enerji gereksinimlerini dizel motorlarından sağlayan sektörler olumsuz yönde etkilenecektir. Bununla beraber petrol kökenli yakıtların dizel motorlarda yanması sonucu, açığa çıkan egzoz gazlarının sebebiyet verdiği çevre kirliliği, kabul edilebilir sınırları zorlamaktadır. Bu sebeplerden dolayı, dizel motorlarda petrole dayalı yakıt tüketiminin azaltılması ve bu motorlardan kaynaklanan emisyonların düşürülmesi için alternatif yakıtlara ihtiyaç duyulmaktadır.

Dünya genelinde alternatif yakıt araştırmaları önemli destekler görmektedir. Başta Avrupa Birliği ülkeleri olmak üzere birçok gelişmiş ülkede bu konuda ciddi çalışmalar yapılmakta ve olumlu sonuçlar hayata geçirilmektedir. Dizel motorlarda kullanılabilen alternatif yakıtın; ekonomik, yenilenebilir, çevre dostu ve kolay elde edilebilir nitelikteki üstünlüklere sahip olması gerekmektedir. Biyodizel, dizel motorlar için bu gereksinimleri karşılayabilecek özelliklere sahip bir alternatif yakıt türü olarak değerlendirilmektedir [1].

İlk olarak biyodizelin temelleri, 1900'li yılların başında dizel motorunun mucidi Rudolf Diesel tarafından atılmıştır. O yıllarda yaptığı çalışmalar ile bitkisel yağların dizel motorlarda kullanılabileceğini göstermiştir. Fakat o zaman ki şartlarda petrolün daha mantıklı bir yakıt olması, bu sektörün gelişmesine engel olmuştur. Özellikle 1973 yılında yaşanan enerji krizinden sonra, biyokütle enerji kaynakları üzerine çok yoğun araştırmalar başlatılmıştır. Bu araştırmalar içerisinde biyodizel'de yer almıştır. Son yıllarda ise, farklı bitkisel yağlar (yerfıstığı, pamuk, haşhaş, kolza, kanola, soya, ayçiçeği, mısır, ) [1-3,7], hayvansal yağlar (balık yağı, tavuk yağı, hayvansal iç yağ) [4-6], atık kızartma yağları [8] ve atık kimyasal yağlar ( motor yağı) [9] biyodizel üretimi için kullanılmıştır.

Belirtilen yağlardan biyodizel üretmek için proliz, seyreltme, emülsiyon ve transesterifikasyon olmak üzere dört farklı yöntem kullanılır. Bunların arasında

transesterifikasyon en yaygın kullanılan yöntemdir [10]. Biyodizelin biyolojik olarak parçalanabilmesi, zehirleyici etkisinin bulunmaması ve düşük emisyon profili, yüksek setan sayısı, yüksek oksijen içeriği, kükürt ve aromatik içermemesi, üstün yağlama yeteneği onu cazip kılan özellikleri olarak sıralanabilir [11-14]. Bununla beraber, biyodizel mevcut dizel motorlarda büyük çaplı bir değişikliğe ihtiyaç duyulmaksızın kullanılabilir [15]. Biyodizel, dizel yakıtı eşdeğer özelliklere sahip olduğundan, doğrudan yakıt olarak kullanılabilirdiği gibi herhangi bir oranda dizel yakıtı ile karıştırılıp da kullanılabilmektedir [16].

Yapılan çalışmalarda, biyodizelin dizel motorda doğrudan kullanıldığı zaman, standart dizel yakıtı göre egzoz emisyonları daha iyi olmasına rağmen, motor performansını etkileyen bazı olumsuz faktörlere de rastlandığı görülmüştür [17]. Bunlar aşağıda maddeler halinde belirtilmiştir:

- Viskozitesinin dizel yakıtı kıyasla yüksek olması
- Donma noktasının yüksek olması
- Enjektörden püskürtülen yakıtın kötü atomize olması sonucu yanma performansındaki düzensizlikler
- Yakıt filtrelerinin tıkanması
- Isıl değerinin düşük olması

Biyodizel yakıtlarının dizel motorlarda kullanımını daha uygun hale getirmek amacıyla, dizel yakıtı farklı oranlarda biyodizel karıştırılması önerilmiştir [17]. Bu çalışmalarla, daha önce belirtilen sorunlar büyük oranda düzeltilmesine rağmen, yanma veriminin düşük olmasından kaynaklı, yakıt sarfiyatı ve egzoz emisyon değerlerinin daha da iyileştirilmesi gerekliliği vurgulanmıştır [17]. Ayrıca biyodizelin, standart dizel yakıtın içerisine ilave edilme oranının artmasına bağlı olarak, donma noktasının yüksek değerlere ulaştığı görülmüştür. Bu durum, soğuk hava şartlarında biyodizel yakıtını kullanan motorların performansını düşürdüğü bilinmekte hatta bazen motorların çalışmamasına da sebep olmaktadır. Bu şartlar altında, biyodizel yakıtını kullanan motorlarda, yakıt katkı maddesi kullanılması kaçınılmaz bir ihtiyaç olmuştur. Belirtilen sorunlara çözüm üretmek amacıyla literatürde bazı çalışmalar mevcuttur. Yapılan çalışmalarda, seryum (Ce), seryum-demir (Ce-Fe), platinyum (Pt), platinyum-seryum (Pt-Ce), demir (Fe), molibden (Mo), mangan (Mn), nikel (Ni) ve magnezyum (Mg) gibi katkı maddeleri biyodizel içerikli yakıtlara ilave edilmiştir [18-20].

Kelso ve ark (1990), motor performansını arttırmak ve emisyon değerlerini düşürmek amacıyla platinyumu standart dizel yakıtı katkı maddesi olarak kullanıp dizel motordaki etkisini incelemiştir [21]. Elde edilen sonuçlardan özgül yakıt tüketiminin, CO ve HC

emisyollarının azaldığı görölmüştür. May ve Hirs (2005), dizel yakıtta katkı maddesi olarak demir-mangan bileşimini önermiştir [22]. Önerilen katkı ilaveli yakıtın dizel motor üzerinde testlerini gerçekleştirerek, motor güç değerlerinde artış, yakıt sarfiyatı ve duman emisyonunda azalmaların meydana geldiğini gözlemlemiştir. Okuda ve ark. (2009), dizel motorda eksozdan açığa çıkan partikülleri azaltmak amacıyla, platinyum-seryum katkı maddesinin etkisini araştırmıştır [23]. Sonuçlara göre, önerilen yakıt katkı maddesinin ilave edilmesiyle, karbon partiküllerinin azaldığı görölmüştür. Bu üç çalışmanın ortak özelliği, katkı maddelerinin sadece standart dizel yakıt üzerindeki etkisinin incelenmesidir.

Son yıllarda, katkı maddelerinin biyodizel yakıtlarına ilave edilerek, motor performansının ve egsoz emisyonlarının iyileştirilmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla, Keskin ve ark. (2007), tall yağından üretilen biyodizel yakıtı üzerine, Mn ve Ni katkı maddelerinin etkisini incelemiştir [24]. Üretilen biyodizelin B60'ına, 8 ve 12 µmol/lit oranlarında Mn ve Ni bazlı katkı maddesi ilave edilmiştir. Her iki katkı maddesinin de B60 üzerinde, viskozite ve parlama noktası gibi özellikleri iyileştirdiği gözlemlenmiştir. Fakat dizel motor testlerinde, 12Mn'li yakıt numunesi kullanıldığı zaman, HC, CO, duman emisyonlarının daha düşük olduğu görölmüştür. Gürü ve ark. (2010), magnezyum katkı maddesinin etkisini, tavuk yağından üretilen biyodizel üzerinde incelemiştir [25]. B10 yakıt numunesine 12Mg oranında katkı ilave ederek, numuneler tek silindirli, direkt enjeksiyonlu bir dizel motorda test edilmiştir. B10+12Mg numunesinin kullanımında, dizel yakıtla kıyasla; özgül yakıt tüketiminde ve NO<sub>x</sub> emisyonunda sırasıyla % 5.2 , % 5 artış, CO ve duman emisyonunda ise sırasıyla % 13 ve %19 oranında azalma olduğu gözlemlenmiştir. Yine aynı yazar diğeri bir çalışmasında, transesterifikasyon yöntemi kullanılarak, atık zeytin posası yağından biyodizel üretmiştir. Bu biyodizelin fiziksel ve kimyasal özelliklerini iyileştirmek amacıyla içerisine farklı oranlarda Mn bazlı katkı maddesi ilave etmiştir [26]. B25 yakıtına göre, B25+12Mn yakıt numunesinde, viskozite değerinde % 20.37, parlama noktasında 7 °C ve akma noktasında 15 °C'lik bir azalma olmuştur. Kanan ve ark. (2011), atık palm yağından üretilen biyodizel yakıtının özelliklerini iyileştirmek amacıyla yakıt numunesine 5–50 µmol/lit aralığındaki 10 farklı oranda demir klorür (FeCl<sub>3</sub>) ilave etmiştir [27]. En iyi dozlamamanın 20 µmol/lit oranındaki numune olduğu kimyasal analizlerle tespit edilmiştir. 20 µmol/lit FeCl<sub>3</sub> ilaveli yakıt numunesi, enjeksiyon süresini ve enjektör basıncını değiştirilmek suretiyle farklı işletme şartlarında, 1500 d/dak sabit hızda dizel bir motorda, performans ve emisyon değerleri incelenmiştir. Karşılaştırma sonunda dizel yakıtla kıyasla CO, HC, duman emisyonlarında sırasıyla %52.6, %26.6 ve %6.9 oranlarında azalma, CO<sub>2</sub> ve NO<sub>x</sub> emisyonlarında ise az miktarda artış tespit edilmiştir. Kalam ve ark (2008), nonil fenoksi (nonyl phenoxy) asetik

asiti bir katkı maddesi olarak düşünmüş ve palm yağı biyodizeline ilave ederek dizel bir motorda test etmiştir [28]. Test sonunda, özgül yakıt tüketiminde NO, CO ve HC emisyonlarında azalma tespit etmiştir.

Yapılan çalışmalarda etkili sonuçlar elde edilmesine rağmen, biyodizel yakıtına ilave edilen metal bazlı katkı maddeleri en uygun dozlama oranının üzerinde yakıtı ilave edildiğinde numunenin fiziksel ve kimyasal özelliklerini iyileştirmediği hatta olumsuz etkilediği görülmüştür. Bir diğer deyişle, metal bazlı katkı maddelerinin yakıtı ilave edilme oranının bir optimum değerinin olduğu, bu değer üzerine çıkıldığında ise, yoğunluk, viskozite ve parlama noktası gibi özelliklerinin olumsuz bir şekilde etkilendiği görülmüştür. Bu nedenle, metal bazlı katkı maddesinin en uygun oranı belirlendikten sonra, farklı bir katkı maddesi ile yakıtın fiziksel ve kimyasal özellikleri desteklenmelidir.

Bu tezin temel amacı, farklı özelliklere sahip yağlardan biyodizel üretilerek, bu biyodizellerin üzerine  $MnO_2$ , dodekanol ve propilen glikol gibi katkı maddelerinin, motordaki, performans ve egzoz emisyon değerlerine etkisini incelemektir. Ayrıca biyodizel yakıtının dizel motorda uzun süreli kullanılmasında, motor parçaları üzerindeki etkisini araştırmaktır.

## 2. DİZEL MOTOR YAKITLARI ve SINIFLANDIRILMASI

Bu bölümde petrol kökenli yakıt olan dizel yakıtı ve çeşitli yağlardan üretilen biyodizel yakıtlarının temel özellikleri ayrıntılı bir şekilde incelenmiştir.

### 2.1. Dizel Yakıtı

Dizel yakıtı ham petrolün damıtımı esnasında 200–300 °C kaynama noktası aralığında elde edilen üçüncü ana üründür. İçeriğinde karbon atomu sayısı 8 ile 16 arasında olan yüzlerce çeşit farklı hidrokarbon bileşenlerini ihtiva etmektedir. Çok çeşitli olan bu hidrokarbonlar, parafin, naften, olefin ve aromatik olarak dört ana gruba ayrılırlar. Hidrokarbonlar organik bileşikler olup yapısını hidrojen ve karbon atomları oluşturur [28]. Dizel yakıtı hidrokarbonların dışında az miktarda da olsa kükürt, oksijen, kobalt, çinko, fosfor, potasyum ve magnezyum içermektedir [29]. Tablo 2.1.'de EN590 dizel yakıtı standartları verilmektedir.

**Tablo 2.1.** EN590 dizel yakıtı standartları

| Özellik              | Birim              | Alt limit | Üst limit | Ölçüm metodu |
|----------------------|--------------------|-----------|-----------|--------------|
| Yoğunluk (15 °C'de)  | Kg/m <sup>3</sup>  | 820       | 845       | EN ISO 3675  |
| Viskozite (40 °C'de) | mm <sup>2</sup> /s | 2.0       | 4.5       | EN ISO 3104  |
| Parlama noktası      | °C                 | 55        | -         | EN ISO 2719  |
| Kükürt               | mg/kg              | -         | 50        | EN ISO 20846 |
| Setan sayısı         | -                  | 51        | -         | EN ISO 5165  |
| Su miktarı           | mg/kg              | -         | 200       | EN ISO 12937 |
| Kül                  | %                  | -         | 0,01      | EN ISO 6245  |
| Karbon kalıntısı     | %                  | -         | 0,30      | EN ISO 10370 |

ASTM standartlarına göre dizel yakıtları üç derecede değerlendirilmektedir.

- No. 1-D ve düşük kükürtlü No. 1-D: Petrolün damıtılmasında elde edilir. Değişken devir ve yük şartlarında çalışan motorlarda kullanılan uçucu-damıtık bir yakıttır.
- No. 2-D ve düşük kükürtlü No. 2-D: Damıtma ürünlerini ihtiva eden No.1D'ye göre buharlaşma özelliği az olan ağır hizmet ve endüstri motorları yakıtıdır.
- No. 4-D: Damıtma ürünlerinden ve bazı atıklardan oluşan düşük veya orta hız motorlarının yakıtıdır.

## **2.2. Dizel Yakıtının Kimyasal ve Fiziksel Özelliklerinin İncelenmesi**

### **2.2.1. Viskozite**

Viskozite, akışkanların akmaya karşı gösterdiği direnç olup olarak tanımlanmaktadır. Dizel yakıtı viskozitesi, enjektör püskürtme karakteristiklerini ve buna bağlı olarak da silindir içerisinde meydana gelecek yanmayı doğrudan etkilemektedir Viskozite küçüldükçe borulardaki akış direnci azalmakta, püskürtme ile oluşan yakıt demeti içindeki yakıt damlacık çapları küçülmektedir. Dolayısıyla motorda yanma iyileşmekte ve is emisyonları azalmaktadır. Ancak viskozitenin çok düşük olması yakıt sistemindeki kaçakları arttırmaktadır. Viskozitenin standartların üstünde olması ise yakıt pompası ve enjektörlerin iyi yağlanmamasına, enjeksiyon esnasında damlacık boyutlarının normalden daha büyük olmasına, ayrıca enjektörlerde tıkanma ve sıkışmalara neden olabilmektedir [17].

### **2.2.2. Yoğunluk**

Yoğunluk, birim hacimdeki ağırlıktır. Yakıtın yapısı, karbon-hidrojen miktarı, yakıtın parçalanması ve tutuşma kabiliyeti ile ilgili ön bilgi verir. Yakıtın yoğunluğu elde edildiği ham petrolün cinsine göre değişmekte olup kg/lt olarak ifade edilmektedir. EN590 standartlarına göre dizel yakıtlarının özgül ağırlıkları 15 °C' de 820-845 kg/m<sup>3</sup> arasında olmalıdır.

### **2.2.3. Akma Noktası**

Akma noktası yakıtın akma özelliğini yitirdiği en düşük sıcaklıktır. Diğer bir ifadeyle jelleşmeye başladığı sıcaklıktır. Dizel yakıtının özellikle soğuk havalarda akıcılık özelliğini

kaybetmemesi gerekir. Akma noktasının yüksek olması soğuk havalarda yakıt filtresini tıkayarak motorun çalışmamasına neden olabilir. Özellikle soğuk bölgelerde çalışan dizel motorlarında yakıtın akma noktasını düşürmek için içerisine belirli oranlarda gaz yağı ve değişik kimyasal katkı maddeler katılmaktadır.

#### **2.2.4. Bulutlanma Noktası**

Bulutlanma noktası sıvıların soğutulduğunda kristalleşmesinin ilk görülmeye başladığı sıcaklığı gösterir. Bu sıcaklıkta yakıt içerisinde katı yapılar oluşmaya başlamıştır. Oluşan bu katı yakıt partikülleri yakıt filtresinin tıkanmasına neden olur. Bulutlanma noktası ile akma noktası birbirinden farklıdır. Bu değerler yakıtların soğukta çalışma özelliklerinin önemli bir göstergesidir.

#### **2.2.5. Donma Noktası**

Yakıtın katılaştığı, akmasının durduğu sıcaklıktır. Yakıtın soğuk havalarda kullanılma kabiliyetini belirler. Belli bir sıcaklığa kadar soğuyan yakıt molekülleri kristalleşir ve sıcaklık daha fazla düşünce donar. Kristalleşmiş yakıt, yakıt sistemini tıkayarak yakıtın akışına engel olur. Bu nedenle yakıtların donma noktası bölgenin dış hava sıcaklığından 5–10 °C daha düşük olmalıdır.

#### **2.2.6. Isıl Değer**

Yakıtların ısı değerleri genellikle birim kütlelerinin enerjisi ile verilmektedir. Yakıtın sürekli akışlı bir açık sistemde tam olarak yanması ve yanma sonu ürünlerinin, yanma işlemine girenlerin haline getirilmesi durumunda çevreye verilen ısı enerjisi eşittir. Başka bir deyişle bir yakıtın ısı değeri, yakıtın yanma entalpisinin mutlak değerine eşittir.

Isıl değer, yanma sonu ürünleri içindeki  $H_2O$ 'nun bulunduğu faza bağlıdır. Böylece yanma sonu ürünleri içindeki  $H_2O$  sıvı fazında ise üst ısı değeri, yanma sonu ürünleri içindeki  $H_2O$  buhar fazında ise alt ısı değeri adını alır.

Bir yakıtın ısı değeri veya yanma entalpisi, yanma işleminde yer alan bileşiklerin oluşum entalpilerinden hesaplanabilir. Bir yakıtın üst ısı değeri, alt ısı değeri ile yanma sonu ürünleri içindeki su buharının buharlaşma gizli ısılarının toplamına eşittir.

Motorlardaki yanma sonu sıcaklıklarda su her zaman buhar olarak bulunduğundan, ısı değer, alt ısı değer olarak verilmelidir. Yakıt enerjisinin miktarının göstergesi olduğu için ısı değerinin büyük olması istenir.

#### **2.2.7. Parlama Noktası**

Sıvı bir yakıtın yanabilmesi için bu yakıtın buharı ile havanın belirli oranlar dâhilinde karışmış olması gerekir. Bir yakıt ne kadar kolay buhar haline gelebilirse, hava ile yanıcı bir karışım oluşturması da o derece kolay olur. Yakıtın bu kolay yanabilme özelliği, parlama noktası ile tespit edilir. Yanıcı bir cismin parlama noktası, bu cismin hava ile yanıcı karışım meydana getiren bir buhar çıkardığı en düşük sıcaklık derecesine denir. Parlama noktası direk olarak motor performansı ile ilişkili olan bir yakıt özelliği değildir. Daha çok yakıtın emniyetli olarak kullanımı ve depolama özelliğini belirlemek için ölçülür. Dizel yakıtının alevlenme sıcaklığı ASTM-93 'e göre 55 °C'nin altında olmamalıdır.

#### **2.2.8. Setan Sayısı**

Dizel motorlarda yakıtın kendi kendine tutuşabilme kabiliyetini gösteren ölçüye setan sayısı denir. Dizel yakıtının en önemli özelliklerinden birisidir. Setan sayısının artması dizel motorda yanma prosesinin en önemli kısmını oluşturan tutuşma gecikmesi süresini kısaltmakta ve dolayısıyla ani yanma öncesi yanma odası içerisinde biriken yakıt miktarı azalmaktadır. Bu ise ani yanma safhasında basınç artış hızının azalmasına neden olmaktadır.

Setan ( $C_{16}H_{34}$ ) düz zincir yapıda parafin grubundan bir yakıt olup, setan sayısı 100 kabul edilmiştir. Alfametilnaften'in ( $C_{10}H_7CH_3$ ) ise setan sayısı 0'dır. Bu iki yakıtın karışımının setan sayısı, hacimsel olarak, karışımındaki % setan miktarı ile belli olur. Ölçülecek yakıtın setan sayısı standart motorda (CFR veya BASF motoru) ölçülen tutuşma gecikmesi (TG) süresinin, setan-alfametilnaften karışımlarının TG süreleri ile karşılaştırılması sonucu belirlenir.

Setan sayısı yukarıda anlatılan yöntemle belirlenmesi zor ve pahalı olduğu için dizel yakıtının tutuşma özelliği dizel indeksi ile de tespit edilebilir. Bunun yanında kızıl ötesi yöntemlerle de yaklaşık olarak setan sayısı ve setan indisi çok kolay ve hızlı olarak ölçülebilmektedir.

### **2.2.9. Uçuculuk**

Genel olarak sıvıların, sıvı durumdan gaz durumuna geçme sıcaklığına uçuculuk noktası denir. Dizel yakıtının uçuculuğu, damıtma sıcaklığının %90'ı ile ifade edilir. Öyle ki; bir yakıt damıtma sıcaklığına kadar ısıtılsa miktarının %90'ı buhar haline geçebilmelidir. Uçuculuk kabiliyeti yüksek yakıtlar bilhassa küçük dizel motorlarında yakıt tüketimini ve dumanı azaltır. Emisyon değerini düşürür. Dizel yakıtların uçuculuk özellikleri standart bir aparatta kontrollü ısıtma ile yakıttan alınan numuneden arka arkaya parçaların arıtıldığı sıcaklık cinsinden ifade edilir. En çok kullanılan metotlardan biri ASTM D86'dır. Yakıtın damıtma ya da kaynama aralığı kimyasal bileşimine bağlıdır ve bu nedenle viskozite, parlama noktası, kendiliğinden tutuşma sıcaklığı, setan sayısı ve yoğunluk gibi yakıt özelliklerini de etkilemektedir.

### **2.2.10. Su ve Tortu Miktarı**

Yakıt içindeki su ve tortu, yakıt pompası ve enjektörlerde aşınma ve paslanmaya yol açar. Normalden fazla su, yakıtın yanmasını kötü yönde etkiler. Tortu ise filtrelerin tıkanmasına, enjeksiyon sisteminde birikerek tortulaşmaya ve diğer motor arızalarına neden olabilir. EN 590 standartlarına göre dizel yakıtı için su ve tortu miktarı 200 mg/kg değerini aşmamalıdır.

### **2.2.11. Kül**

Kül, küçük katı parçacıklardan ve yağ ya da yakıtın içerisinde bulunan suda çözülebilir metalik bileşiklerden oluşur. Kül miktarı, az bir yakıtın içerisindeki tüm yanıcı maddelerin tüketilip yanması ile ölçülür. Yanmayan artıklar kül olarak isimlendirilir ve yanmış yakıt örneğinin ağırlığının yüzdesi olarak belirlenir. Kül özellikle dizel yakıtı için zararlıdır. Enjeksiyon sistemindeki kapalı rekor parçalarının aşınmasını hızlandırır ve yakıt filtresi ile püskürtme deliklerinin tıkanmasına neden olabilir. EN 590 standardının dizel yakıtı için verdiği kül miktarı kütleye % 0,01'dir.

### **2.2.12. Kükürt**

Ham petrolün içerisinde kükürt bileşikleri bulunur. Ham petrolün içerisindeki kükürdün çoğu damıtma sırasında arıtılır. Yakıt ve yağlarda, karbon ve hidrojen sonra

en önemli eleman kükürttür. Kükürt yakıtın içerisinde istenmeyen bir maddedir. Yanma sonucunda oluşan su ile reaksiyona girerek  $H_2SO_4$  (sülfürik asit) oluşturur. Bu da motor parçalarını kimyasal olarak aşındırır, silindir cidarı ile segmanların mekanik aşınmasını hızlandırır. EN 590 standartlarına göre dizel yakıtı içerisinde bulunana kükürt miktarı 50 mg/kg aşmamalıdır.

#### **2.2.13. Bakır Şerit Korozyon**

Yakıtın bakır veya bakır içeren malzemeler üzerinde bıraktığı aşındırma etkisinin bir göstergesidir. Esas olarak yakıt içerisindeki asit miktarını ifade etmektedir. ASTM D 130'e göre yakıtın korozyon etkisini belirlemek için parlatılmış bakır şerit 3 saat süreyle 50 °C sıcaklıktaki yakıt içerisinde bekletilir. Daha sonra çözücü (solvent) ile yıkandıktan sonra yüzeydeki kararma ve korozyon miktarı karşılaştırma yöntemi ile belirlenir.

#### **2.2.14. Karbon Kalıntısı**

Yakıtın havasız bir ortamda ısıtılması sonucunda arta kalan karbon miktarına verilen isimdir. Karbon artığı, yakıtın eksik yanma şartları altında karbon-is oluşturma özelliğini belirtir. Yakıtın karbon artığı yüzdesi fazla ise, yanma sırasında tamamı yanmaya iştirak etmez ve is yapar. Bu da enjektör memelerinin karbon bağlamasına ve meme deliklerinin tıkanmasına neden olur [17] .

### **2.3. Biyodizel Yakıtı**

Biyodizel, dizel motorlarda sorunsuz kullanılabilen en uygun alternatif yakıttır. Biyodizel yakıtının diğer alternatif yakıtlara kıyasla en avantajlı kılan özelliği, motor parçaları üzerinde herhangi bir ekleme veya değişiklik yapılmaksızın kullanılabilmesidir. Hidrojen, CNG, LPG vb. gibi alternatif yakıtların kullanıldığı motorlarda ek bir sisteme ihtiyaç duyulmaktadır.

Biyodizel yakıtı aşağıda ifade belirtilen avantajlara sahiptir.

- Biyodizel, kimyasal yapısı itibariyle, biyolojik olarak yenilebilir ve doğada kolay bozunabilir bir yakıt türüdür.
- Biyodizel saf durumda suya karıştığında %80 – 90 oranında bozunur ve bu bozunma süresi yaklaşık bir aydır.

- Biyodizel yakıtının kullanımı sera etkisi yapan gazların etkisi önlenmektedir.
- Biyodizel %11 oranında oksijen içerdği için motordaki yanma verimi yüksektir.
- Petrol dizeline kıyasla biyodizelin setan sayısı yüksektir, biyodizel yakıtının bu özelliği motorlardaki vuruntuyu azaltmaktadır.
- Biyodizel iyi bir yağlayıcı özellikte olması nedeniyle motor parçaları üzerindeki aşınmayı minimize etmektedir.
- Dizel motordaki biyodizel kullanımında, ticari yakıt istasyonlarında ve araç tamir servislerinde herhangi bir değişikliğe gerek duyulmamaktadır.
- Biyodizel yakıtlarında alevlenme noktası yüksektir. Bu özellik, depolama ve taşıma hususunda daha güvenli bir ortam oluşturmaktadır.
- Biyodizel, dizel yakıtı ile her oranda olarak karıştırılabilmektedir. Bu özellik dizelin kalitesine olumlu katkı sağlamaktadır. Yanma sonucu oluşan emisyon değerlerindeki iyileşme ve motor parçaları üzerindeki yağlama özelliği bu duruma örnek olarak verilebilir.
- Bir ülkede biyodizel kullanımının (petrol ithalatının azalmasına, milli ekonomiye, yağlı tohum tarımının gelişmesine, doğal enerji kaynaklarının değerlendirilmesine, tarım sektöründeki iş imkânlarının artmasına ve sosyo-ekonomik yapısının iyileşmesi gibi) birçok maliyetsel artışı mevcuttur.

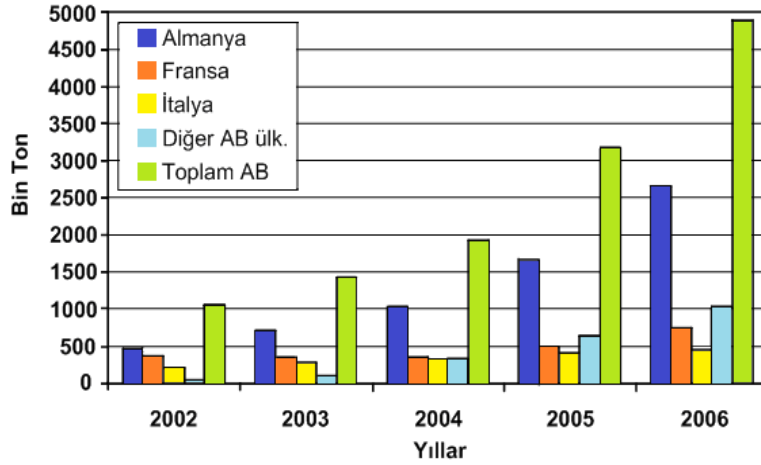
Biyodizel yakıtının yukarıda belirtilen avantajların yanı sıra aşağıda belirtilen dezavantajları da bulunmaktadır [30].

- Donma noktasının yüksek olması nedeniyle soğuk havalarda yakıt katkı maddesi gerektirmektedir.
- Biyodizel motorine göre daha düşük ısı değere sahiptir, bu durum yakıt sarfiyatını arttırmaktadır.
- Biyodizel ile piyasada satılan katkılı motorin karıştırıldığında motorin içinde bulunan tortular biyodizel tarafından çözülür. Çözünen bu tortular yakıt filtresinin tıkanmasına neden olabilir. Dizel motorda daha öncesinde dizel yakıt kullanıldıysa kurum ve tortu oluşmuş olabilir. Oluşan bu kurum ve tortu tabakası biyodizel kullanımıyla çözünerek yakıt fitresini tıkayabilir veya enjektör deliğinin kesitini daraltabilir.

- Biyodizelin çözücü özelliğinden dolayı daha önceden dizel yakıtından kaynaklanan kurum ve tortuları çözerek yakıt filtresinin hatta enjektörlerin tıkanmasına sebep olabilir.
- Bazı araçların yakıt sistemleri biyodizel kullanımına uygun değildir. Yakıt sisteminin parçaları ve özellikle de yakıt pompasında sızdırmazlık için kullanılan contalar lastik veya nitrik yapıda ise değiştirilmesi gerekmektedir. Eğer motorda % 100 biyodizel kullanılacaksa Sızdırmazlık için kullanılan bu malzemeler değiştirilmesinde yarar vardır. B20 ve altındaki bir oranda karışım kullanılıyorsa bu değişime gerek olmayabilir. Biyodizelden kaynaklı bir korozyon oluşuyorsa, önlemek için lastik contalar plastik contalarla değiştirilmelidir.

#### 2.4. Dünyada Biyodizel Üretimi

2001 yılından önce ticari açıdan cazip olmayan biyodizel üretimi, 2001 yılından sonra ülke yönetimlerinin teşvik ve vergi muafiyeti uygulamalarıyla ciddi bir yükselişe geçmiştir. AB ülkelerindeki özel sektör temsilcileri başta olmak üzere, birçok ülkede bu sektöre yatırımlar yapılarak sektör genişletilmiştir [31]. Bu durum Şekil 2.1’den açık bir şekilde görülmektedir.



Şekil 2.1. 2002–2006 yılları arasında Avrupa birliği üye ülkeleri biyodizel üretim değerleri

AB ülkeleri yılda yaklaşık 1.350.000 ton biyodizel üretmektedir. Bu üretimin büyük bir bölümü Almanya’da gerçekleştirilmektedir. Almanya, 2010 yılındaki 2 milyon ton/yıl biyodizel üretme hedefini yakalamıştır. Okul servisleri, belediye araç filoları, iş makineleri,

tarım makineleri ve askeri araçlarda öncelikli olarak biyodizel kullanılmaktadırlar. İngiltere’de her yıl 100.000 ton bitkisel ve hayvansal atık yağ toplanmakta ve biyodizel üretiminde kullanılmaktadır. Bitkisel ve hayvansal atık yağların toplanması, taşınması ve değerlendirilmesi İngiltere’de yeni iş alanları oluşturmuştur. Belçika’da kişi başına toplanabilir atık yağ miktarı yılda 13 kg’dır. ABD’de ise toplanabilir atık yağ miktarı kişi başına yılda 7 kg’dır. Kanada hükümeti 2010 yılına kadar yılda 500 milyon litre biyodizel üretmeye karar vermiş ve hedefini tutturmuştur [31].

#### **2.4.1. Dünya Ülkelerinde Biyodizel Mevzuatları**

*Arjantin:* Biyoyakıt yasası ticari katılımcıların ve hükümet yetkililerinin katılımı ile kongrede görüşülmüş. Bu yasaya göre; dizel motorlarda biyodizelin, benzinli motorlarda ise etanolün %5 oranında kullanımının zorunlu olacağı maddeler karara bağlanmıştır. Mali teşvik uygulaması olarak;15 yıl boyunca biyoyakıtlardan vergi alınmayacağı belirtilmiştir.

*Avustralya:* Biyoyakıt Aksiyon Planı isimli çalıştayda 2010 yılında biyoyakıt üretiminin 350 milyon litre olması hedeflenmiştir. Mali teşvik uygulamalarının neticesinde 350 milyon litre hedefine ulaşılmıştır.

*Brezilya:* 2008 yılından önce % 2 oranında biyodizel kullanımı isteğe bağlı iken 2008 yılında zorunlu olmuştur.2013 yılı itibariyle bu oranın %5 olması kararlaştırılmıştır. Mali teşvik uygulaması devam etmektedir.

*Kanada:* Yenilenebilir Yakıtlar Standardı kapsamında 2010 yılında %5 oranında biyoyakıt kullanılacağı yasalarla sabitlemiştir. Mali teşvik uygulaması halen devam etmektedir.

*Avrupa:* Avrupa’da Biyoyakıt uzmanlarının belirlediği doğrultuda, benzin ve dizel kullanımına 2005 yılında %2 ve 2010 yılında ise %5.75 oranında biyoyakıtlardan karıştırılması gerçekleştirilmiştir. Mali teşvik uygulamaları devam etmektedir. AB üyesi ülkelerde ÖTV muafiyeti mevcuttur.

*Endonezya:* Toplam yakıt tüketiminin 2010 yılında %2’sinin, 2025 yılında %5’inin biyoyakıtlardan karşılanması gerçekleştirilecektir. Mali teşvik uygulaması mevcut değildir.

*Malezya:* Malezya, “Ulusal Biyoyakıt Programı” çerçevesinde % 5 biyodizel kullanımını gerçekleştirmek için çalışmaktadır. Mali teşvik uygulaması mevcut değildir.

*Yeni Zelanda:* Mali teşvik uygulaması olmamasına rağmen 2012 yılı için tasarladıkları 65 milyon litre biyoyakıt üretim hedefini tutturulmuştur.

*Avusturya:* Gümrük vergi muafiyeti kısmen uygulanmaktadır. Toplam biyoyakıt kullanımı; 1 Ocak 2005'den itibaren %2,5, 1 Ocak 2007'den itibaren %4,3, 1 Ocak 2008'den itibaren %5.75 oranında mecburi kılınmıştır. Direktifle %5.75 oranında biyoyakıt kullanımının 2010 yılına kadar uygulanması hedeflenmiştir.

*Fransa:* Gümrük vergi muafiyeti kısmen uygulanmaktadır. Genel olarak çevreyi kirletme oranına göre yakıtlar vergilendirilmektedir. Dağıtıcılara, tüm benzin ve dizel kullanımı içinde;

2005 yılında %1.2, 2006 yılında %1.75, 2007 yılında %3.5, 2008 yılında %5.57, 2009 yılında %6.25, 2010 yılında da % 7 oranında biyoyakıt karıştırma zorunluluğu getirilmiştir.

*Almanya:* Gümrük vergi muafiyeti uygulanmaktadır. Biyoyakıtlar kullanımı zorunluluğu 2007'den itibaren yürürlüğe girmiş olup, % karışım oranları henüz kesinleşmemiştir.

*İtalya:* Gümrük vergi muafiyeti kısmen uygulanmaktadır. Kullanım zorunluluğu teklifi senatodan geçmiştir. Buna göre; 1 Ocak 2006 yılından itibaren, taşımacılıkta kullanılan yakıtlarda %1 oranında biyoyakıt kullanımı mecburidir. Bu mecburi kullanım oranı, her yıl %1 oranında arttırılarak 2010 yılına kadar uygulanacaktır.

*Hollanda:* Gümrük vergi muafiyeti kısmen uygulanmaktadır. 1 Ocak 2007'den itibaren %2 oranında biyoyakıt karışımı mecburi, 2010 yılında, AB direktifinde yer alan %5.75 oranındaki biyoyakıt kullanım oranına ulaşılması hedeflenmiştir.

*İspanya:* Gümrük vergi muafiyeti uygulanmaktadır. Biyoyakıt kullanım zorunluluğu yoktur. 2010 yılında taşımacılıkta kullanılan toplam yakıtın %5.85'inin biyodizel ve biyoetanolden karşılanması hedeflenmiştir. Bunu takip eden beş yıl içerisinde de biyodizel ve biyoetanol üreticilerine 2.85 milyar € vergi indirimi yapılarak destek sağlanması hedeflenmiştir.

*İsveç:* Gümrük vergi muafiyeti uygulanmaktadır. 1 Ocak 2009 yılında biyoyakıt kullanımı zorunlu hale gelmiştir. 2009 yılında “yeşil sertifika” uygulamasına geçilmesi üzerinde çalışılmaktadır. Yeşil sertifika uygulamasına istinaden gümrük muafiyeti tekrar düzenlenecektir.

*İngiltere:* Gümrük vergi muafiyeti kısmen uygulanmaktadır. Taşımacılıkta biyoyakıt kullanımı, 2008 yılından itibaren zorunlu olmuştur. 2008 yılında taşımacılıkta kullanılan yakıtın %2,5' i, 2009 yılında %3,75'i, 2010 yılında % 5'inin biyoyakıtlardan karşılanması zorunlu olacaktır. Bu uygulamalar yürütülürken gümrük vergi muafiyeti de mutlaka uygulanacaktır [30].

#### **2.4.2. Ülkemizde Biyodizel**

Biyodizel, Türkiye’de mevcut olanaklarla uygulamaya alınabilecek en önemli alternatif yakıt seçeneklerinden biri olarak gösterilebilir. Biyodizeli üretmek ve kullanmak için Türkiye yeterli ve uygun alt yapıya sahiptir. Türkiye’de kolza (kanola), ayçiçeği, soya, aspir gibi yağlı tohum bitkilerinin enerji amaçlı tarımı mümkündür. Bu durum, tarım sektörüne ciddi bir hareket kazandırabilir. Kışı ılıman geçen bölgelerimizde kanola ikinci ürün olarak da ekilebilir. Tarımı sorunsuz ve maliyeti buğday ve ayçiçeğinden az olan kanola, Türk çiftçisi için önemli bir kurtarıcı olacağı düşünülmektedir. GAP Bölgesi’nde 10 Milyon Dekar alanda sulu tarım olanağı vardır; bölgede pamuğun yanı sıra dönüşümlü olarak kanola ve/veya soya ekimi olumlu olacaktır. Çok genel bir hesaplama ile GAP Bölgesi’nde kanola ve/veya soya ekimi ve biyodizel üretimi ile yılda 1,5 milyon ton biyodizel üretilebileceği söylenebilir. Enerji amaçlı tarımın, Türkiye tarım politikası içinde yer alması, çiftçinin yönlendirilmesi yararlı olacaktır. Türkiye biyodizel üretimini gerçekleştirebilecek teknolojiye ve yakıtın kullanımına kolaylıkla uyum sağlayabilir. Çeşitli kapasitelerde biyodizel üretim tesisleri öncelikle kırsal kesimde konuşlandırılarak, tarım makinelerinin, kamyonların yakıtı kullanımı özendirilebilir. Ayrıca çevre kirliliğinin yoğun olduğu büyük şehirlerde toplu taşımacılıkta biyodizel kullanımı yararlı olacaktır. Biyodizelin ilgili bakanlıklarca ve devlet kurumlarınca tanımlanması, mevzuatının oluşturulması, yatırım teşvikleri ve vergi indirimleri ile desteklenmesi gereklidir. Konunun başarılı uygulamasının olduğu ülkelerde, devlet- petrol firmaları- biyodizel üreticileri ve tüketicileri koordinasyonu düzgün ilerlemektedir. Biyodizel devletimizce, yenilenebilir enerji olarak tanınmalı ve desteklenmelidir. [32,33].

#### **2.5. Biyodizel Üretim Yöntemleri**

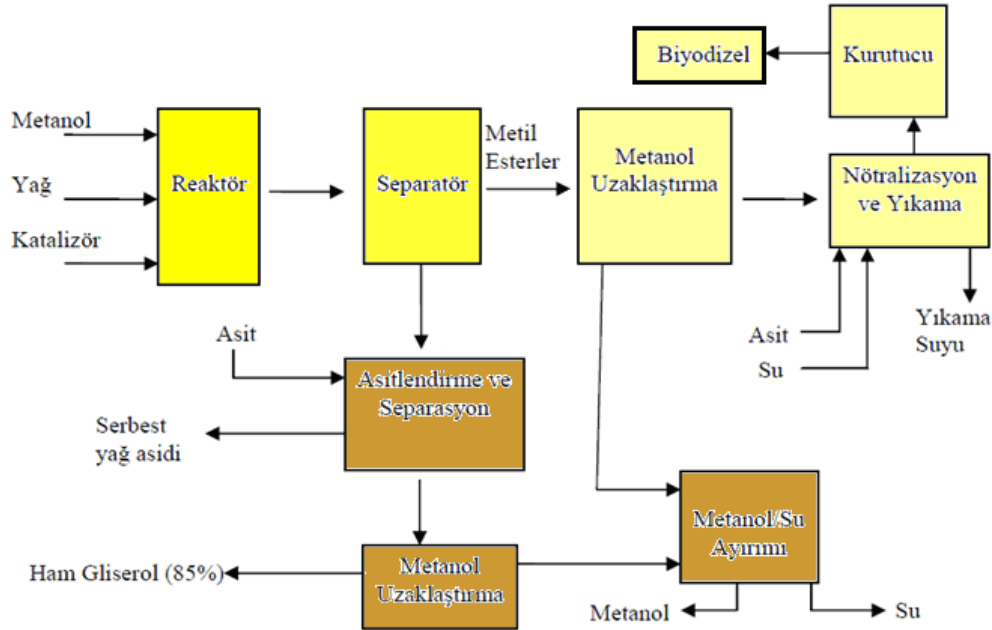
Farklı bitkisel yağların dizel motorlarda sorunsuz bir şekilde yakıt olarak kullanılabilmesi için bazı ön işlemlere tabi tutulması gerekmektedir. Bu işlemler tercih edilme sırasına göre transesterifikasyon, seyreltme, mikro emülsiyon ve proliz olarak sıralanılabilir.

Yüksek viskoziteli yağların uygun bir seyrelticiyle viskozitelerini düşürme yöntemine seyreltme denir. Genellikle seyreltme işleminde motorin kullanılır. Mikro emülsiyon oluşturma, normalde karışmayan iki sıvı ile bir veya daha fazla amfi filinin bir araya getirilmesidir. Proliz veya craking, kimyasal bağların daha küçük moleküller oluşturmak

üzere kırılması işlemidir. Bu yöntemde reaksiyon işlemi kapalı bir kapta gerçekleştirilerek ısı parçalanma ile bağları kırılmaktadır. Transesterifikasyon ise, yağların (trigliseridlerin) viskozitesini azaltmak amacıyla uygulanan bir reaksiyondur. Bu işlemde yağ, monohidrik bir alkol türü ile (metanol, etanol, izopropil), katalizör (asidik, bazik katalizörler ile enzimler) varlığında reaksiyona tabi tutulur. Bu reaksiyon sonucunda yağ asitleri elde edilir. Yukarıda açıklanan yöntemler arasında en rağbet gören işlem transesterifikasyondur.

## 2.6. Biyodizelin Transesterifikasyon Reaksiyonu ile Üretim Aşamaları

Biyodizel kullanımının çevreci bir yakıt olması ve milli ekonomiye katkısının beklenen düzeyde gerçekleşebilmesi, ancak uluslar arası standartlarda uygun bir üretim ile sağlanabilir. Üretim sürecindeki yetersizlikler hammadde ve ürün kayıplarına yol açmasının yanı sıra, üretimde kesilmelere neden olarak verimliliği düşürecek ve ürünün kalitesini bozacaktır. Düşük kalitedeki ürün kullanım zorluklarına ve kullanıldığı motorların doğrudan zarar görmesine neden olacaktır. Biyodizel üretiminin çeşitli metotları olmakla birlikte günümüzde en yaygın olarak kullanılan yöntem transesterifikasyon yöntemidir. Biyodizel üretiminde aşağıdaki işlem basamakları takip edilmektedir. Ayrıca; biyodizel üretim süreci şematik olarak Şekil 2.2’ de gösterilmiştir.



Şekil 2.2. Biyodizel üretim şeması

### **2.6.1. Alkol ve Katalizörün Karıştırılması**

Katalizör olarak genellikle sodyum hidroksit veya potasyum hidroksit kullanılır. Katalizör, bir karıştırıcı kullanılarak alkol içerisinde çözülene kadar karıştırılır. Reaksiyonda kullanılması planlanan katalizörün ve alkolün türü kullanım miktarını değiştirmektedir.

### **2.6.2. Reaksiyon**

Alkol/katalizör karışımı kapalı reaksiyon kabın içerisine doldurulur ve yağ ilave edilir. Daha sonra alkol kaybını önlemek amacıyla sistem tamamen atmosfere kapatılır. Reaksiyon karışımı, reaksiyonu hızlandırmak amacıyla belli bir sıcaklıkta tutulur ve reaksiyon gerçekleşir. Önerilen reaksiyon süresi 1 ile 8 saat arasında değişmekte olup bazı sistemler reaksiyonun oda sıcaklığında olmasını gerektirir. Bitkisel yağların kendi esterlerine tamamen dönüşmesi için normalden daha fazla alkol kullanılır. Beslemedeki bitkisel yağların içerisindeki su ve serbest yağ asitlerinin miktarının izlenmesi konusunda dikkatli olunmalıdır. Serbest yağ asidi veya su seviyesinin yüksek olması sabun oluşumu ve gliserinin ayrılmasına neden olabilir.

### **2.6.3. Ayırma**

Reaksiyon tamamlandıktan sonra iki ana üründen biri gliserin diğeri de biyodizeldir. Her biri reaksiyonda kullanılan miktardan arta kalan önemli miktarda metanol içerir. Gerek görülürse bazen reaksiyon karışımı bu basamakta nötralize edilir. Gliserin fazının yoğunluğu, biyodizel fazınınkinden çok daha fazla olduğundan bu iki faz gravite ile ayrılabilir ve gliserin fazı çöktürme kabının dibinden kolayca çekilebilir. Bazı durumlarda bu iki malzemeyi daha hızlı ayırmak amacıyla santrifüj kullanılır.

### **2.6.4. Alkolün Uzaklaştırılması**

Gliserin ve biyodizel fazları ayrıldıktan sonra her bir fazdaki fazla alkol bir flaş buharlaştırma veya distilasyon prosesi ile uzaklaştırılarak reaksiyon karışımı nötralize edilir. Her iki durumda da alkol distilasyon kolonu kullanılarak geri kazanılır. Geri kazanılan alkol içerisinde su bulunmamalıdır.

### **2.6.5. Gliserin Nötralizasyonu**

Gliserin yan ürünü, kullanılmamış katalizör ve bir asit ile nötralize edilmiş sabunlar içerir ve ham gliserin olarak depolanmak üzere depolama tankına gönderilir. Bazı durumlarda bu fazın geri kazanılması sırasında oluşan tuz gübre olarak kullanılmak üzere geri kazanılır. Pek çok durumda tuz gliserin içerisinde bırakılır. Su ve alkol ham gliserin olarak satışa hazır olan % 80–88 saflıkta gliserin elde etmek amacıyla uzaklaştırılır. Daha ayrıntılı işlemlerde gliserin %99 veya daha yüksek saflığa kadar distillenerek kozmetik ve ilaç sektörüne pazarlanır.

### **2.6.6. Metil Ester Yıkama İşlemi**

Gliserinden ayrıldıktan sonra elde edilen biyodizel içindeki kalıntı katalizör ve Sabun artıklarının uzaklaştırılması amacıyla ılık suyla yavaşça yıkanır, suyu uzaklaştırılır ve Gerekli koşullarda depolanır. Bazı proseslerde bu basamak gereksizdir. Bu, açık amber-sarı renkte, petrol dizeline yakın viskoziteli bir sıvı veren üretim sürecinin sonudur. Bazı sistemlerde de biyodizel distillenerek uzaklaştırılması sağlanır.

### **2.7. Biyodizel Üretiminde Dikkat Edilecek Hususlar**

- Metil alkol sağlık açısından çok zararlı bir madde olduğundan dikkatli kullanılmalıdır.
- Sodyum hidroksit çok bazik ve nem tutma özelliğine sahip olduğundan nemsiz ortamda depolanmalıdır. Dikkatli kullanılmazsa kalıcı hasarlara sebebiyet verebilir.
- Biyodizel üretiminde atık yağlar kullanıldığında; bu yağlar 20 °C’ de konsantre ve pıhtı halinde ise kimyasallar ilave edilmeden önce kullanılmış yağın ısıtılması gerekir.
- Üretimde kullanılacak kimyasal malzemeler sıcaklığa ve korozyona dayanıklı olmalıdır.

Sodyum metoksit (metil alkol+sodyum hidroksit) çözeltisi, çok toksin ve boyalara karşı çok koroziftir. Sodyum hidroksit, çinko, alüminyum veya teneke kaplarla reaksiyona girer. Dolayısıyla bu tür kaplar kesinlikle kullanılmamalıdır. Mümkünse çelik kaplar kullanılmalıdır [34].

## **2.8. Transesterifikasyon Reaksiyonuna Etki Eden Faktörler**

Transesterifikasyon ile biyodizel üretiminde ürün verimi üzerinde reaksiyon sıcaklığı, reaksiyon süresi, alkol/yağ molar oranı, katalizör cinsi ve miktarı, alkol cinsi ve miktarı ile yağın içerisinde serbest yağ asidi ve suyun bulunması etkilidir. Bu değişkenlerin etkileri aşağıda açıklanmıştır.

### **2.8.1. Reaksiyon Sıcaklığının Etkisi**

Reaksiyon oranı reaksiyon sıcaklığı tarafından güçlü bir şekilde etkilenmektedir. Bununla birlikte yeterli zaman olursa oda sıcaklığında da reaksiyon tamamlanma noktasına kadar ilerleyebilir [35]. Reaksiyon sıcaklığının artması, özellikle süper kritik şartlar için ester dönüşüm verimi üzerinde olumlu bir etkiye sahiptir [36]. Transesterifikasyon reaksiyonunun, kullanılan alkol ve yağa bağlı olarak farklı sıcaklıklarda gerçekleşebileceğini ve genelde reaksiyon sıcaklığı alkolün kaynama noktasına yakın bir sıcaklıkta tutulması gerektiğini belirtmişlerdir [37]. Yapılan başka bir çalışmada diğer şartların aynı olduğu, 60, 45 ve 32 °C olmak üzere üç farklı sıcaklıkta ester verimlerinin sırasıyla %94, 87 ve 64 olduğu belirtilmiştir [38].

### **2.8.2. Alkol/Yağ Molar Oranının Etkisi**

Yüksek molar oranlı reaksiyonlarda çok daha kısa sürede daha yüksek oranda ester dönüşümü gerçekleşmektedir[34]. Ester ürünlerini etkileyen en önemli parametrelerden birisi de alkol/yağ molar oranıdır. Stokiyometrik transesterifikasyon reaksiyonu 1 mol gliserid ile 3 mol alkol reaksiyona girerek 3 mol yağ asidi esteri ile 1 mol gliserin oluşturur [38-39]. Molar oranının kullanılan katalizör ile ilişkisi vardır. Asit katalizörlü bir reaksiyonda soya yağı/BuOH molar oranının 30:1 gerektiği durumda, alkali katalizör kullanıldığında sadece 6:1 molar oranda verilen reaksiyon zamanı için aynı ester verimi elde edilmiştir [38-40]. 1:3, 1:6 ve 1:10 olmak üzere üç farklı bitkisel yağ/alkol molar oranlarında ayçiçeği, mısırözü ve kolza yağı kullanarak biyodizel üretimini yaptıkları çalışmalarında 1:3 molar oranında ester veriminin düşük olduğunu 1:6 molar oranında verimin arttığını ve 1:10 molar oranında ise daha yüksek verimin elde edildiğini belirtmişlerdir [41]. Demirbaş, alkol/yağ molar oranının artmasıyla alkil ester veriminde artış olduğunu belirtmiştir [42]. Felizardo ve ark., reaksiyondaki metanol miktarındaki artış

ile metil ester fazının ayrışmasının kolaylaştığını bununla beraber viskozitenin azaldığı ve metil ester fazı saflığının %98'in üzerine arttığını belirtmişlerdir [43].

### **2.8.3. Katalizör Cinsi ve Miktarının Etkisi**

Biyodizel üretiminde alkali katalizör, asidik katalizör veya enzimler kullanılmaktadır. Genellikle asit katalizör olarak sülfürik, organik sülfonik, fosforik, hidroklorik asitler; alkali katalizör olarak da NaOH, KOH, karbonatlar ve sodyum metoksit, sodyum etoksit, sodyum proksit gibi alkoksitler kullanılır. Lipazlar da biyokatalizör olarak kullanılabilirler [41]. Eğer yağın içeriğinde serbest yağ asidi yoksa alkali katalizörlü transesterifikasyon, asit katalizörlü reaksiyondan daha etkilidir. Fakat bitkisel yağ yüksek oranda serbest yağ asidi veya su içeriyorsa asit katalizörlü reaksiyon kaçınılmazdır [39].

### **2.8.4. Serbest Yağ Asitleri ve Suyun Etkisi**

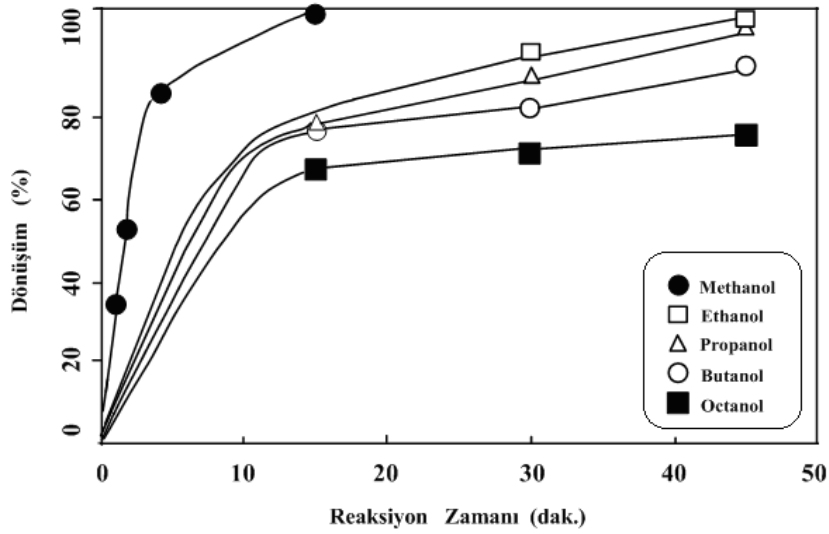
Biyodizel üretimi için normal şartlarda sadece alkali katalizörlü transesterifikasyon reaksiyonu yeterli olmaktadır. Fakat biyodizel üretimi için kullanılacak yağın içeriğinde serbest yağ asidi ve su varsa bu istisnai bir durum olarak değerlendirilir. Serbest yağ asidi ve su; sabunlaşmaya, katalizörün tükenmesi ve katalizör etkinliğinin azalmasına sebep olur. Transesterifikasyon reaksiyonunun gerçekleştirilebilmesi için serbest yağ asidi oranının düşürüleceği ön işlemlerin uygulanması gerekir. Yağın içerisindeki serbest yağ asitlerinin, alkali katalizör kullanıldığında, sabunlaşmaya sebep olduğunu ve bunun da biyodizelin gliserinden ayrılmasını önlediğini belirtmişlerdir [44].

### **2.8.5. Reaksiyon Süresinin Etkisi**

Yağın alkolle reaksiyona girme süresi, alkolün cinsine bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Şekil 2.3'de farklı alkol tipleri ile gerçekleştirilen reaksiyonlarda ilk on dakika içerisinde reaksiyonun çok yavaş olduğu görülmektedir. Ayrıca özellikle metil alkolün kullanıldığı reaksiyonun on beşinci dakikalarında maksimum dönüşümün sağlandığı görülmektedir [37].

### 2.8.6. Alkol Cinsi ve Miktarının Etkisi

Transesterifikasyon reaksiyonunda metanol, etanol, propanol ve bütanol gibi kısa zincirli alkoller kullanılır. Bu alkoller arasında reaksiyon sonu ürünlerde verimsel açıdan bazı farklılıklar vardır. Farklı tip alkol kullanıldığında reaksiyon bitiş zamanına bağlı olarak ester dönüşümü de etkilenmektedir. Bu durumun görsel ifadesi Şekil 2.3’de sunulmuştur [37].



Şekil 2.3. Farklı tip alkol kullanımının reaksiyon zamanına bağlı olarak ester dönüşümü üzerindeki etkisi

### 2.9. Biyodizelin Özellikleri

Tablo 2.2.’de biyodizel yakıtının ASTM D 6751-02’ye göre sağlaması gereken özellikleri verilmiştir. Biyodizel yakıtlarının viskozite ve yoğunlukları hammadde ve yapılan işlemlere bağlı olarak değişmekle birlikte dizel yakıtından biraz daha yüksektir. Isıl değerleri ise içerisinde oksijen bulundurdıkları için yaklaşık %10 daha azdır. Setan sayıları hammadde olarak kullanılan yağın kompozisyonuna bağlı olarak değişebilmektedir. Biyodizel yakıtları içinde esterleştirme işlemi esnasında kullanılan katalizörlerden gelen ve uzaklaştırılamayan artık metallerin miktarı yakıtın kül miktarını artırır. Yakıt içinde bulunan çözünebilen metaller tortuya neden olurlar ve bu tortular iç parçaları aşındırarak zarar verir.

**Tablo 2.2.** TS EN 14214 otomotiv yakıtlar-yağ asiti metil esteri

| Özellik                              | Birim              | Sınırlar |         | Ölçüm metodu             |
|--------------------------------------|--------------------|----------|---------|--------------------------|
|                                      |                    | En az    | En çok  |                          |
| Ester Muhtevası                      | % (m/m)            | 96.5     | -       | EN 14103                 |
| Yoğunluk 15 °C                       | Kg/m <sup>3</sup>  | 860      | 900     | EN ISO3675 EN ISO 12185  |
| Viskozite 40 °C                      | mm <sup>2</sup> /s | 3.50     | 5       | EN ISO 3104              |
| Parlama Noktası                      | °C                 | 120      | -       | EN ISO 3679              |
| Kükürt Muhtevası                     | Mg/kg              | -        | 10      | EN ISO20846 EN ISO 20884 |
| Karbon Kalıntısı                     | % (m/m)            | -        | 0.3     | EN ISO 10370             |
| Setan Sayısı                         | -                  | 51.0     | -       | EN ISO 5165              |
| Sülfatlanmış Kül Muhtevası           | % (m/m)            | -        | 0.02    | ISO 3987                 |
| Su Muhtevası                         | Mg/kg              | -        | 500     | EN ISO 12937             |
| Toplam Kirlilik                      | Mg/kg              | -        | 24      | EN 12662                 |
| Bakır Şerit Korozyonu (50 °C 3 saat) | °C                 | Sınıf 1  | Sınıf 1 | EN ISO 2160              |
| Oksidasyon Kararlılığı (110°C)       | H                  | 6.0      | -       | EN 14112                 |
| Asit Sayısı                          | Mg KOH/g           | -        | 0.5     | EN 14104                 |
| İyot sayısı                          | g I/100 g          | -        | 120     | EN 14111                 |
| Linolenik Asit Metil Esteri          | % (m/m)            | -        | 12      | EN 14103                 |
| Metanol Muhtevası                    | % (m/m)            | -        | 0.2     | EN 14110                 |
| Monogliserit Muhtevası               | % (m/m)            | -        | 0.8     | EN 14105                 |
| Diğliserit Muhtevası                 | % (m/m)            | -        | 0.2     | EN 14105                 |
| Trigliserit Muhtevası                | % (m/m)            | -        | 0.2     | EN 14105                 |
| Serbest Gliserol                     | % (m/m)            | -        | 0.02    | EN14105 EN 14106         |
| Toplam Gliserol                      | % (m/m)            | -        | 0.25    | EN 14105                 |
| Grup I Metaller (Na + K)             | Mg/kg              | -        | 5       | EN14108 EN 14109         |
| Grup II Metaller (Ca + Mg)           | Mg/kg              | -        | 5       | EN 14538                 |
| Fosfor Muhtevası                     | Mg/kg              | -        | 10      | EN 14107                 |

Biyodizel hammaddeleri genel olarak çok düşük miktarda kükürt içerirler ancak biyodizel üretim prosesi esnasında proteinler, katalizör ve/veya nötralizasyon materyalleri kükürt oluşumuna neden olabilir. Biyodizel yakıtlarda bulutlanma noktası dizel yakıtına göre daha yüksek olmakta ve bu da soğukta çalışma özelliklerini kötüleştirmektedir. Bulutlanma noktası esterleştirme kompozisyonu içerisindeki doymuş yağ asidi miktarı ile anlaşılabilir. Doymuş yağ asidi miktarı yüksek olan hammaddelerden üretilen biyodizellerin bulutlanma noktası da yüksek olmaktadır. Bu sebepten dolayı bulutlanma noktasının düşürülmesi için yakıt içine özel katkı maddeleri karıştırılmalı veya biyodizel üretimi esnasında kullanılacak yüksek doymuş yağ asitliğine sahip yağlar düşük yağ asitliğine sahip yağlarla karıştırılmalıdır. Biyodizel üretiminde yıkama sonunda suyun tamamen uzaklaştırılması ve filtrelenmesi de önemli bir noktadır [45].

### **2.9.1. Soğukta Akış Özellikleri**

Biyodizel ve biyodizel-motorin karışımları, motorinden daha yüksek akma ve bulanma noktasına sahiptir; bu durum yakıtların soğukta kullanımında sorun çıkarır. Akma ve bulanma noktaları uygun katkı maddeleri (anti-jel maddeleri) kullanımı ile düşürülebilmektedir. Biyodizel-motorin karışımları 4 °C üzerinde harmanlama ile hazırlanmalıdır. Soğukta harmanlamada biyodizelin motorin üzerine eklenmesi, sıcakta harmanlama da ise karışımda daha fazla olan kısmın az kısım üzerine eklenmesi önerilmektedir. Eğer harmanda soğumaya bağlı olarak kristal yapılar oluşursa, harmanın tekrar normal görünümünü kazanması için bulutlanma noktası üzerine ısıtılması ve karıştırılması gerekmektedir [32].

### **2.9.2. Toksin Etki**

Biyodizelin insan vücudu üzerinde negatif bir toksin etkisi bulunmamaktadır. Biyodizelde toksin bir etki olmamasına, rağmen standart dizel yakıtta olduğu gibi havalandırma sistemi, koruyucu tedbirler alınması gerekmektedir. Ağızdan alınmada öldürücü doz 17.4 g biyomotorin/kg vücut ağırlığı şeklindedir. Sofra tuzu için bu değer 1.75 g tuz/kg vücut ağırlığı olup, tuz biyodizelden 10 kat daha yüksek öldürücü etkiye sahiptir. İnsanlar üzerinde yapılan elle temas testleri biyodizelin ciltte %4'lük sabun çözeltisinden daha az toksin etkisi olduğunu göstermiştir [32].

### **2.9.3. Biyolojik Olarak Bozunabilirlik**

Biyodizelin kimyasal bağ yapısı oluşturan karbon atomu (C<sub>16</sub>-C<sub>18</sub>) hızlı ve kolay bir şekilde doğada parçalanarak çözülür. Biyodizel suya bırakıldığında bir ayda %95 oranında, standart dizel yakıt ise %40 oranında çözünür [32].

### **2.9.4. Depolama**

Ticari faaliyet gösteren petrol istasyonlarının yapmış olduğu depolama yöntemi, biyodizel için de geçerlidir. Biyodizelin depolandığı tank direkt güneş ışığına maruz kalmayacak şekilde tasarlanmıştır. Ayrıca aşırı sıcak bir ortamda olmamalı, temiz ve nemden uzak tutulmalıdır. Yakıt tankının malzeme yapısı paslanmaz çelik, yumuşak çelik veya florlanmış yapıda olmalıdır. Tank malzemesinde plastik, mika, kauçuk vb.

malzemeler kullanılmalıdır. Çünkü biyodizel bu malzemelerle kimyasal reaksiyona girerek özelliğini kaybeder. Depodaki boru bağlantı noktalarında keçe, conta türü sızdırmazlık elemanları kullanılması gerekirse, biyodizel ile uyumlu Viton B tipi elastomerik malzemelerin kullanımı önerilmektedir [32].

### **3. BİYODİZEL YAKITLARININ HAZIRLANMASI**

Bu bölümde, biyodizel üretimi için kullanılan bitkisel yağlar ve bu yağlara özgü biyodizel üretim adımları ayrıntılı bir şekilde belirtilmiştir. Ayrıca çalışmanın temel amaçlarından biri olan katkı maddelerinin özellikleri ve biyodizel yakıtlarına karıştırma oranları da sunulmuştur.

#### **3.1. Çalışmada Kullanılan Yağlar ve Özellikleri**

Bu çalışmada, üzüm çekirdeği yağı, kayısı çekirdeği yağı, ceviz yağı, haşhaş yağı ve atık ayçiçeği yağı olmak üzere toplam 5 farklı bitkisel yağdan biyodizel üretimi gerçekleştirilmiştir. Belirtilen ilk üç yağdan (üzüm çekirdeği yağı, kayısı çekirdeği yağı, ceviz yağı) daha önce biyodizel üretilmemiştir. Bu nedenle, öncelikle önerilen 3 yağın biyodizel yakıtına uygunluğu incelenmiş ve özellikleri çıkarılmalıdır. Bu yağların yanı sıra kullanılan diğer iki yağ (haşhaş yağı ve atık ayçiçeği yağı) ise, tamamen karşılaştırma amacıyla kullanılmıştır.

##### **3.1.1. Üzüm Çekirdeği Yağı**

Üzüm, dünya üzerinde yetiştiriciliği yapılan en eski meyve türlerinden biridir. Üzümün anavatanı, Anadolu'yu da içine alan ve küçük asya denilen bölgedir. Üzüm diğer meyvelerle kıyaslandığında en fazla çeşide sahip olan türlerden biridir. Dünyada bilinen 10.000'nin üzerinde üzüm çeşidi olduğu bilinmektedir. Yurdumuz ise üzümün anavatanı olması nedeniyle 1200'ün üzerinde üzüm çeşidine sahiptir. Ülkemiz üzüm üretimi bakımından 4. sırada yer almaktadır. Üzüm hemen her toprakta yetişir. Az sulamayla yetinmesi, yamaç arazilerinin de değerlendirilebilir olması üretimini cazip kılmaktadır [46]. Üzüm, üreticisi desteklendiği takdirde ekonomiye ve farklı birçok sektöre ciddi oranlarda bir ivme kazandıracak nitelikte bir üründür. Üzüm; sirke üretimi yapan fabrikaların, şarap

fabrikalarının ve meyve suyu fabrikalarının hammaddesidir. Ayrıca üzüm yerel üretimle (pekmez, orcik, sucuk, reçel, köfter, bastık, samsa, pestil vb.) iç pazarda tüketilmektedir. Belirtilen bu sektörlerde üzümün suyu alındıktan sonra çekirdek ve posa atık ürün statüsündedir. Bu atıl durumdaki çekirdek kurutulmak suretiyle, vidalı pres yağ makinesinde yağ ve posa kısmının ayrıştırıldığı bir işleme tabi tutulabilmektedir. Bu işlemin sonunda elde edilen üzüm çekirdeği yağının, son zamanlarda ilaç sanayinde kısmen kullanımı başlamış olsa da, toplam rezerv açısından bakıldığında biyodizel sektörüne alternatif ek bir yağ olabilecek kapasitededir.

### **3.1.2. Ceviz Yağı**

İnsanlık tarihi kadar eski bir meyve olan Ceviz (*Juglans regia*) yabani formları da olan, tropik bölgeler dışında dünyanın her yerinde yetiştirilen bir türdür. Cevizin anavatanı olarak İran'ın Ghilan Bölgesi ve Çin gösterilmekle birlikte aslında çok daha geniş bir bölgenin doğal bitkisidir. 18 türü olmasına rağmen ceviz denildiğinde ilk akla gelen Anadolu, İran ve İngiliz Cevizi türleridir. Türkiye, köklü bir meyvecilik kültürüne sahip olup, birçok meyve türünde olduğu gibi cevizin de yetiştirilebildiği uygun ekolojilere sahiptir. Ülkemiz dünya ceviz üretiminde A.B.D. ve Çin'den sonra üçüncü sıradadır [47].

Ceviz kuruyemiş olarak tüketildiği gibi ilaç ve kozmetik sektöründe de kullanılmaktadır. Ceviz içi %30 posa, %70 yağ içermektedir. Posa kısmı lif ve protein bakımından oldukça zengin olması hasebiyle, kaliteli diyet ürün üreticileri ceviz içini hammadde olarak kullanmaktadır. Üretilen bu diyet ürünlerinin kullanımı son zamanlarda belirgin bir şekilde artmıştır. Yağ üretimi de bu artışa paralel bir seyir izlemektedir. Fakat üretilen bu diyet ürünlerde yağ ve posa ayrıştırılarak posa kısmı kullanılmaktadır. Yağ kısmı o sektörde kullanılmamaktadır. Bu durumu maliyetsel açıdan değerlendirsek, elde edilen posa, ceviz içinin maliyetinin tamamını karşılamaktadır. Elde edilen yağ ise farklı sektörlerde değerlendirilmektedir. Bu çalışmada ceviz yağının kullanılmasının nedeni, yağ asiti içeriğinin farklı olması ve biyodizel olarak dizel bir motordaki performansının denenmemiş olmasıdır.

### **3.1.3. Kayısı Çekirdeği Yağı**

Dünya kayısı üretimi yaklaşık 2,5 milyon ton olup, Türkiye 500 bin ton üretim ile dünyada birinci sırada yer almaktadır. Kuru kayısı dışsatımında, Türkiye ilk sıralarda yer

almakta ve bu pazarın %80'ini elinde tutmaktadır. Üretilen kayısının çekirdekleri son yıllara kadar kuruyemiş olarak talep görmekteydi. Fakat son yıllarda yapılan araştırmalar neticesinde kayısı çekirdeğin içeriğinde siyanür ve benzeri zehir etkisi bulunan maddelerin tespit edilmesiyle, kuruyemiş olarak tüketimi ciddi oranda azalmıştır. Kayısı çekirdeği yaklaşık %50 oranında yağ ihtiva etmektedir [48]. Bu yağ son zamanlarda kozmetik sektöründe değerlendirilmektedir. Bu yağa farklı bir alternatif sektör oluşturmak amacıyla dizel bir motordaki performansı incelenmiştir.

#### **3.1.4. Atık Ayçiçeği Yağı**

Bu çalışmada atık kızartma yağının biyodizel üretiminde kullanımının nedeni tamamen karşılaştırma amaçlıdır. Karşılaştırma için özellikle bu yağın seçilmesinin nedeni biyodizel üretiminde en çok kullanılıyor olması ve maliyet açısından en ucuz olmasıdır. Ayrıca bu metil esteri katkı maddeleriyle destekleyip, fiziksel ve kimyasal yönden daha kaliteli bir yakıt haline getirmek atık yağların incelenmesinin nedenleri arasındadır. Ayrıca çevreye ve insan sağlığına verdiği zarar da düşünüldüğünde atık yağlar hususunda daha detaylı çalışmalar yapılması gerekliliği hassasiyetle değerlendirilmelidir.

#### **3.1.5. Haşhaş Yağı**

Haşhaş yağı, soğuk pres yöntemiyle elde edildiği için daha önce dizel bir motorda performansı denenmemiş olan yağlar (üzüm çekirdeği, kayısı çekirdeği ve ceviz) ile objektif bir kıyaslama yapabilmek açısından bu çalışmaya dahil edilmiştir. Çalışmada kullanılan tüm yağların yağ asit kompozisyonlarının birbirinden farklı olması, çalışmaya ayrı bir zenginlik kazandırmıştır.

### **3.2. Yağ Asit Kompozisyonu**

Yağlı tohumlu bitkilerde; yetiştikleri coğrafyanın, iklimin, hava şartlarının, az ya da çok sulanmasının ve farklı yetiştirme özelliklerinin, yağın asit dağılımı üzerinde değişikliğe sebep olduğu bilinmektedir. Bu nedenle, çalışmada kullanılan yağların, yağ asit kompozisyonlarının bilinmesi gerekmektedir. Yağ asit kompozisyonu, bir yağdan üretilen yakıtın motordaki performansı ve emisyonu hakkında net bir sonuç üretmese de yağın bir yakıt olarak kullanılabilirliği hakkında ön bilgiler vermektedir.

Bir yağın doymuş yağ asitlerinden oluşması (C14:0, C16:0, C18:0) üretilecek olan biyodizel yakıtının setan sayısının yüksek değerde olacağına işaret eder. Ayrıca doymamış yağlara göre oksidasyona daha az yatkın olmasını sağlamaktadır [49]. Çalışmada kullanılan yağların asit içerikleri Tablo 3.1’de sunulmuştur [50]. Yağların asit oranları incelendiğinde oleik ve linoleik asit bakımından oldukça zengin bir kimyasal yapıda olduğu görülmektedir.

**Tablo 3.1.** Yağ asit kompozisyonu

| Yağ asiti türü       | Karbon Bağı | Kayıp çekirdeği yağı (%) | Üzüm çekirdeği yağı (%) | Haşhaş yağı (%) | Ceviz yağı (%) | Atık ayçiçeği yağı (%) |
|----------------------|-------------|--------------------------|-------------------------|-----------------|----------------|------------------------|
| Oleik asit           | C18:1       | 67,31                    | 22,00                   | 15,55           | 18,71          | 49,47                  |
| Linoleik asit        | C18:2       | 24,68                    | 64,07                   | 71,66           | 57,50          | 42,13                  |
| Palmitik asit        | C16:0       | 5,62                     | 8,56                    | 9,44            | 6,65           | 5,38                   |
| Stearik asit         | C18:0       | 1,27                     | 4,41                    | 2,32            | 2,92           | 2,75                   |
| Palmitoleik asit     | C16:1       | 0,72                     | 0,18                    | 0,15            | 0,14           | 0,10                   |
| Margarik asit        | -           | -                        | 0,07                    | 0,06            | -              | -                      |
| Linolenik asit       | C18:3       | 0,08                     | 0,32                    | 0,59            | 13,78          | 0,08                   |
| Miristik asit        | C14:0       | -                        | 0,05                    | 0,05            | -              | 0,07                   |
| Ekosenoik asit       | -           | 0,11                     | 0,15                    | 0,07            | 0,19           | -                      |
| Araşidik asit        | C20:0       | 0,10                     | 1,15                    | 0,11            | 0,11           | -                      |
| Heptadesenenoik asit | -           | 0,09                     | 0,04                    | -               | -              | -                      |
| Toplam (%)           | -           | 100                      | 100                     | 100             | 100            | 100                    |

Mutfağımıza giren her yağ ile biyodizel üretimi yapılabilmesine rağmen biyodizel üretimindeki kalite ve verimin sağlanması, yağların özellikleriyle yakından ilgilidir. Bu yağlarla biyodizel üretilirken üretim yöntemi değişebilmektedir. Çünkü kullanılması planlanan yağın içeriğinde su, serbest yağ asidi (SYA) veya her ikisi birden bulunabilir. Suyun yağ içerisinden uzaklaştırılması, yağ ve suyun kaynama noktalarının farklı olması nedeniyle oldukça kolaydır. Fakat SYA’nın durumu farklıdır. SYA oranı %5’in üzerindeki yağlarda sadece transesterifikasyon yönteminin uygulanması yeterli olmamaktadır. Yağlar SYA oranlarına göre sarı yağ ve kahverengi yağ olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. SYA

oranı % 5–15 aralığındaki yağlar sarı yağ, %15 ten büyük yağlar ise kahverengi yağ olarak adlandırılmaktadır. Bu özellikteki yağlara sadece transesterifikasyon işlemi uygulandığında reaksiyonun gerçekleşmemesi muhtemel bir sonuçtur. Yüksek SYA'ne sahip yağlar, reaksiyon sırasında sabun oluşumuna neden olmakla beraber biyodizel fazı ile gliserin fazının ayrıştırılmasını olanaksız hale getirerek reaksiyonların olumsuz neticelenmesine sebebiyet vermektedir. Transesterifikasyon reaksiyonunun gerçekleştirilebilmesi için SYA oranının düşürüleceği ön işlemlerin uygulanması gerekir. Üretilcek biyodizel yakıtlarının içeriğini tespit etmek amacıyla üretim prosesi oluşturulmadan önce serbest yağ asidi tayini yapılmalıdır [17,19].

### 3.2. Yağlardaki Serbest Yağ Asiti Tayini

Serbest yağ asidi ölçümü yapılırken, ölçümü yapılacak olan yağ numunesinden bir miktar alınarak hassas terazide tartılır, sonra yağın 1/3 'ü oranında fenol ftaleinin alkoldeki çözeltisi ile karıştırılır. Daha sonra 0,2 mol NaOH ile titre edilir, yağ pembeleşmeye doyana kadar NaOH çözeltisi yağa ilave edilir. Şekil 3.1'deki gibi yağ tamamen pembeleşince, titrasyonda kullanılan NaOH (ml cinsinden) çözeltisi tespit edilir. Tespit edilen miktar ile kullanılan NaOH (mol) miktarı çarpılarak  $n_{NaOH}$  bulunur. Bulunan bu değer ile hangi asit cinsinden hesap edilmesi gerekirse o asit cinsinin mol kütlesiyle çarpılıp, çıkan sonuç yağın yoğunluğuna bölünmek suretiyle serbest yağ asit miktarı tespit edilir.



Şekil 3.1. Serbest yağ asidi tayinindeki titrasyon işlemi

Stearik ve oleik asit cinsinden yağların serbest yağ asit oranları yüzde olarak tespit edilmiştir. Tespit edilen bu değerler Tablo 3.2’de verilmiştir.

**Tablo 3.2.** Stearik ve oleik asit cinsinden serbest yağ asit oranları

| Yağ çeşidi            | Stearik asit cinsinden (%) | Oleik asit cinsinden (%) |
|-----------------------|----------------------------|--------------------------|
| Kayısı çekirdeği yağı | 6,80                       | 6,76                     |
| Üzüm çekirdeği yağı   | 2,51                       | 2,50                     |
| Ceviz yağı            | 15,45                      | 15,34                    |
| Haşhaş yağı           | 1,10                       | 1,09                     |
| Atık ayçiçeği yağı    | 1,53                       | 1,48                     |

Serbest yağ asidi tayini sonunda, atık ayçiçeği yağının, haşhaş yağının ve üzüm çekirdeği yağının serbest yağ asit oranının % 5 ‘in altında kayısı çekirdeği yağının %5-%10 aralığında ceviz yağının ise %15’in üzerinde olduğu tespit edilmiştir.

Literatürde serbest yağ asidi oranı yüksek olan yağların biyodizele dönüşümlerinde iki adımlı transesterifikasyon uygulaması yapıldığı görülmüştür [17,19,51-53]. Yani ilk önce bir asit katalizörlüğünde birinci transesterifikasyon, sonra baz katalizörlü ikinci bir transesterifikasyon yapılması önerilmektedir.

### 3.3. Yağdaki Nemin Uzaklaştırılması

Reaksiyon işleminde kullanılacak olan yağların nemden arındırılmış olması oldukça önemlidir. Çünkü suyun, reaksiyonu olumsuz etkilemesinin yanı sıra yeni serbest yağ asitlerinin oluşumuna da sebebiyet vereceği bilinmektedir. Temin edilmiş olan yağlar, soğuk pres yöntemi ile elde edildiği için içeriğinde nem bulunma ihtimali yüksektir. Bu sebepten dolayı, transesterifikasyon işlemine başlamadan önce Şekil 3.2.’deki Heidolph Brinkmann Evaporatör Advant H1 G1 115 036.000.150 / 97.043–364 cihazında vakum altında 72 °C sıcaklıkta, yağın içeriğindeki olası nem uzaklaştırılmıştır. Bu işlem her yağ için yapılmıştır. Yağlar biyodizel üretimi için uygun hale getirildikten sonra üretim prosesi kurulmuştur.



**Şekil 3.2.** Yağın ve biyodizelin içeriğindeki olası nemin uzaklaştırıldığı buharlaştırma işlemi

### **3.4. Metil Esterlerin Hazırlanması**

Bu aşamada bitkisel yağların metil estere dönüştürüldüğü işlem basamakları her yağ için ayrı ayrı aşağıda sunulmuştur. Numuneler arasında üretim prosesinden kaynaklı farklılıklar oluşmaması için üretimin her aşamasında; alkol oranının, katalizör oranının, reaksiyon sıcaklığın, reaksiyon süresinin aynı olmasına özen gösterilmiştir.

#### **3.4.1. Üzüm Çekirdeği Yağı Metil Esterinin Hazırlanması**

1000 ml üzüm çekirdeği yağı üç boyunlu bir balon içerisinde manyetik karıştırıcıda 500 RPM 'de ve 60 °C de karıştırılmıştır. Bir diğer manyetik karıştırıcıda ise kullanılan yağın %20'si kadar (200 ml) metanol içerisinde, yağın %0,4'ü kadar (4 gr) sodyum hidroksit (NaOH) tuzu tamamen çözünene kadar karıştırılmıştır. NaOH tuzu metanol içerisinde tamamen çözüldükten sonra, 60 °C de sabit sıcaklıkta karıştırılmakta olan üzüm çekirdeği yağına azar azar ilave edilmiştir. Şekil 3.3.'deki gibi geri soğutuculu sistem altında 2 saat süreyle Transesterifikasyon reaksiyonu devam ettirilmiştir.



**Şekil 3.3.** Transesterifikasyon reaksiyonu

2 saatin sonunda, Şekil 3.4(a)'da görüldüğü gibi madde ayırma hunisine alınarak gliserin ve metil esterlerin faz ayrışmasını sağlamak için 24 saatlik bir bekleme süresine tabi tutulmuştur. Bekleme süresinin bitiminde yoğunluğu fazla olan gliserinin alt fazı oluşturduğu gözlemlenmiştir. Ayırma hunisinin vanası açılarak alt faz yani gliserin fazı alınmıştır. Her ne kadar reaksiyon sonunda gliserin fazı ayrılmış olsa da; gliserin, tuz ve artık metanol metil ester fazında bulunmaktadır. Biyodizel içerisinde homojen olarak karışan bu maddeleri, metil ester içinden ayırtırmak için yıkama işlemine tabi tutmak gerekmektedir. Yıkama işlemi Şekil 3.4(b)'de verilmiştir. Gliserin, tuz ve metanol ün ortak özelliği suda çözünüyor olmalarıdır. Yıkama işleminde bu maddeler suda çözünerek alt faza alınır. Bu sayede metil esterden ayırtırılmış olur. Daha da saflaşan biyodizel son olarak buharlaştırma işlemine tabi tutularak içeriğindeki nem uzaklaştırılmıştır. Ürün son halini aldıktan sonra filtrelenerek depolanmıştır.



**Şekil 3.4.** Üzüm çekirdeği yağı için; (a) faz ayrışması, (b) yıkama işlemi

#### **3.4.2. Atık Ayçiçeği Yağı Metil Esterinin Hazırlanması**

Kızartma işlemi esnasında kızgın yağ içerisinde ısı ve kütle transferiyle birlikte pişme ve kuruma gerçekleşmektedir. Yağdan gıdaya ısı aktarılmakta ve gıdadan su buharlaşmaktadır. Buharlaşan bu su pişirilmek istenen gıdadan ayrılan sudur. Pişirme işleminin bitiminde suyun büyük kısmı buharlaşıyor olsa da bir kısmı yağ içerisinde kalmaktadır. Kızartma esnasında oluşan reaksiyonlar; hidroliz, oksidasyon ve polimerleşme olarak sınıflandırılmaktadır. Kızartma yağlarının atmosferik oksijen içerisinde özellikle yüksek sıcaklığa maruz kalmasından dolayı yapısında fiziksel ve kimyasal değişimler olmaktadır. Biyodizel üretimi için tedarik edilen atık kızartma yağları önce filtrelenerek içlerindeki katı parçacıklar uzaklaştırılmış, daha sonra buharlaştırılarak içlerinde bulunan su ayrıştırılmıştır. Serbest yağ asidi (SYA) oranı %5'in altında olduğundan üzüm çekirdeği için uygulanan transesterifikasyon reaksiyonu aynı şekilde bu yağ içinde uygulanmıştır.

#### **3.4.3. Haşhaş Yağı Metil Esterinin Hazırlanması**

SYA oranı % 5'in altında olduğundan üzüm çekirdeği için uygulanan transesterifikasyon reaksiyonu aynı şekilde bu yağ içinde uygulanarak Şekil 3.5'deki gibi ürün elde edilmiştir.



Şekil 3.5. Haşhaş yağı ve elde edilen haşhaş yağı metil esterini

#### 3.4.4. Kayısı Çekirdeği Yağı Metil Esterinin Hazırlanması

SYA ölçümü neticesinde, yağdaki SYA miktarı % 6,8 olarak tespit edilmiştir. Bu rakam % 5 den büyük olduğu için kayısı çekirdeği yağı metil esterinin hazırlanmasında önce yağın nötrleştirilmesi gerekmektedir. Diğer bir deyişle asit katalizörlü bir ön işlem uygulanmalıdır. Asit katalizörlü reaksiyonda ise yağlar nötrleştirilip daha sonra bir alkali katalizörle transesterifikasyon yapılabilir. Asit katalizörlü reaksiyonda alkol-yağ molar oranı daha yüksek, reaksiyon süresi daha uzundur [54-56].

Asidik reaksiyonda katalizör olarak kullanılan sülfürik asit miktarının tespiti:

Hesaplamalar kütleli olarak yani gram cinsinden tespit edilmiştir.

Kayısı çekirdeği yağı yoğunluğu = 0,877 gr/cm<sup>3</sup>

1000 ml yağ= 877 gramdır.  $877 \times \frac{6,8}{100} = 59,63$  gr Serbest yağ asidi

1000 ml yağ içerisinde 59,63 gram serbest yağ asidi bulunmaktadır.

$59,63 \text{ gr} \times 0,01 = 0,596$  gr sülfürik asit kullanılması gerekir.

Kullanılması gereken hacim (ml):

$0,596 \text{ gr} / 1,84 \text{ gr / ml} = 0,323$  ml sülfürik asit kullanılmıştır.

1000 ml kayısı çekirdeği yağı üç boyunlu bir balon içerisinde manyetik karıştırıcıda 250 d/d ve 120 °C de karıştırılmıştır. 200 ml metanolün içerisine 0,323 ml sülfürik asit ilave edilerek, 120 °C de sabit sıcaklıkta karıştırılmakta olan kayısı çekirdeği yağına azar azar ilave edilmiştir. Geri soğutucu altında 5 saat süreyle asit katalizörlü esterleşme reaksiyonuna tabi tutulmuştur. 5 saatin sonunda madde ayırma hunisine alınarak gliserin ve

yağın metil esterlerinin faz ayrışması için 24 saatlik bir bekleme süresine tabi tutulmuştur. Bekleme süresinin bitiminde yoğunluğu fazla olan gliserinin alt fazı oluşturduğu görülmüştür. Fakat sadece serbest yağ asitleri reaksiyona tabi tutulduğu için alt fazda çok az miktarda gliserin oluşmuştur. Ayırma hunisinin vanası açılarak alt fazdaki gliserin alınmıştır. Üst fazda ise reaksiyona girmemiş yağ bulunmaktadır. Reaksiyon sonunda gliserin fazı ayrılmış olsa da üst fazdaki yağda; gliserin, sülfürik asit ve artık metanol yağ fazında bulunmaktadır. Yağ içerisinde homojen olarak karışan bu maddeleri, yağın içinden ayırtmak için yıkama işlemine tabi tutmak gerekmektedir. Gliserin, sülfürik asit ve metanol suda %100 çözünmektedir. Yıkama işleminde bu maddeler suda çözünerek alt faza alınıp, yağdan ayrıştırılmıştır. Son olarak yağ buharlaştırma işlemine tabi tutularak yıkama işleminden kalan su buharlaştırılmıştır. Asidik reaksiyon işleminin neticesinde SYA'dan arındırılmış bir yağ elde edilmiştir. Bu işlemin sonucunda tekrar serbest yağ asiti analizi yapılarak yağın içeriğindeki SYA oranı % 6,8 den % 0,11'e düştüğü tespit edilmiştir. İkinci aşamadaki reaksiyon da ise, 1000 ml kayısı çekirdeği yağı üç boyunlu bir balon içerisinde manyetik karıştırıcıda 500 d/d ve 60 °C de karıştırılmıştır. Bir diğer manyetik karıştırıcıda kullanılan yağın %20'si kadar (200 ml) metanolün içerisinde kullanılan yağın % 0,35'i (3,5 gr) kadar sodyum hidroksit (NaOH) tuzu tamamen çözünene kadar karıştırılmıştır. Bu reaksiyon için NaOH tuzu olması gerekenden 0,5 gr az kullanılmasının nedeni asit katalizörlü reaksiyonda serbest yağ asitlerinin reaksiyonunu tamamlaması olarak açıklanabilir. NaOH tuzu metanol içerisinde tamamen çözündükten sonra, 60 °C de sabit sıcaklıkta karıştırılmakta olan kayısı çekirdeği yağına azar azar ilave edilmiştir. Geri soğutucu altında 2 saat süreyle transesterifikasyon reaksiyonu devam ettirilmiştir. 2 saatin sonunda madde ayırma hunisine alınarak gliserin ve yağ esterlerinin faz ayrışması için 24 saatlik bir bekleme süresine tabi tutulmuştur. Bekleme süresinin bitiminde yoğunluğu fazla olan gliserinin alt fazı oluşturduğu görülmüştür. Ayırma hunisinin vanası açılarak alt faz yani gliserin fazı alınmıştır. Her ne kadar reaksiyon sonunda gliserin fazı ayrılmış olsa da gliserin, tuz ve artık metanol biyodizel fazında bulunmaktadır. Biyodizel içerisinde homojen olarak karışan bu maddeleri, biyodizel içinden ayırtmak için yıkama işlemine tabi tutmak gerekmektedir. Gliserin, tuz ve metanol ün ortak özelliği suda çözünüyor olmalarıdır. Yıkama işleminde bu maddeler suda çözünerek alt faza alınır. Bu sayede biyodizelden ayrıştırılmış olur. Bu işlemle beraber daha da saflaşan biyodizel son olarak buharlaştırma işlemine tabi tutulmuştur. Sonra Şekil 3.6'daki ürün filtrelenerek depolanmıştır.



Şekil 3.6. Kayısı çekirdeği yağı ve elde edilen kayısı çekirdeği yağı metil esteri

### 3.4.5. Ceviz Yağı Metil Esterinin Hazırlanması

Yapılan bu analizin neticesinde SYA miktarı % 15,45 olarak tespit edilmiştir. Bu değer % 5 den büyük olduğu için ceviz yağı metil esterinin (CYME) elde edilmesinde yağdaki SYA'ların nötrleştirilmesi gerekmektedir [54-56].

Asidik reaksiyonda katalizör olarak kullanılan sülfürik asit miktarının tespiti:

Hesaplamalar kütleli olarak yani gram cinsinden tespit edilmiştir.

Kayısı çekirdeği yağı yoğunluğu = 0,877 gr/cm<sup>3</sup>

1000 ml yağ= 920 gramdır.  $920 \times \frac{15,45}{100} = 142,14$  gr Serbest yağ asiti

1000 ml yağ içerisinde 142,14 gram serbest yağ asidi bulunmaktadır.

142,14 gr  $\times$  0,01 =1,421 gr sülfürik asit kullanılması gerekir.

Kullanılması gereken hacim (ml):

1,421 gr / 1,84 gr / ml = 0,772 ml sülfürik asit kullanılmıştır.

1000 ml ceviz yağı üç boyunlu bir balon içerisinde manyetik karıştırıcıda 250 d/d ve 120 °C de karıştırılmıştır. 200 ml metanolün içerisine 0.772 ml sülfürik asit ilave edilerek, 120 °C de sabit sıcaklıkta karıştırılmakta olan ceviz yağına azar azar ilave edilmiştir. Geri soğutucu sistem altında 5 saat süreyle asidik reaksiyonlu transesterifikasyon reaksiyonu devam ettirilmiştir. 5 saatin sonunda madde ayırma hunisine alınarak gliserin ve yağ esterlerinin faz ayrışması için bekleme süresine tabi tutulmuştur. Bekleme süresinin

bitiminde yoğunluğu fazla olan gliserinin alt fazı oluşturduğu görülmüştür. Fakat sadece serbest yağ asitleri reaksiyona tabi tutulduğu için alt fazda çok az miktarda gliserin oluşmuştur. Ayırma hunisinin vanası açılarak alt fazdaki gliserin alınmıştır. Üst fazda ise reaksiyona girmemiş yağ bulunmaktadır. Reaksiyon sonunda gliserin fazı ayrılmış olsa da üst fazdaki yağda; gliserin, sülfürik asit ve artık metanol yağ fazında bulunmaktadır. Yağ içerisinde homojen olarak karışan bu maddeleri, yağın içinden ayırtmak için yıkama işlemine tabi tutmak gerekmektedir. Gliserin, sülfürik asit ve metanol suda %100 çözünmektedir. Yıkama işleminde bu maddeler suda çözünerek alt faza alınır. Bu işlemle beraber yağ içeriğindeki inorganik maddelerden ayrıştırılmış olur. Son olarak yağ buharlaştırma işlemine tabi tutularak yıkama işleminden kalan su buharlaştırılmıştır. Birinci reaksiyon neticesinde, serbest yağ asitlerinden arındırılmış yağ elde edilmiştir. Bu işlemin sonucunda tekrar serbest yağ analizi yapılarak yağın içeriğindeki SYA oranı % 15,45 den % 0,21'e düştüğü tespit edilmiştir. Bu tespitin ardından tekrar alkali reaksiyon şu şekilde başlatılmıştır. 1000 ml ceviz çekirdeği yağı üç boyunlu bir balon içerisinde manyetik karıştırıcıda 500 d/d ve 60 °C de karıştırılmıştır. Bir diğer manyetik karıştırıcıda kullanılan yağın %20'si kadar (200 ml) metanolün içerisinde kullanılan yağın % 0,3'ü (3 gr) kadar sodyum hidroksit (NaOH) tuzu tamamen çözünene kadar karıştırılmıştır. Bu reaksiyon için NaOH tuzu olması gerekenden 1 gr daha az kullanılmasının nedeni asidik reaksiyonda serbest yağ asitlerinin reaksiyonunu tamamlaması olarak açıklanabilir. NaOH tuzu metanol içerisinde tamamen çözündükten sonra, 60 °C de sabit sıcaklıkta karıştırılmakta olan ceviz yağına azar azar ilave edilmiştir. Geri soğutucu sistem altında 2 saat süreyle transesterifikasyon reaksiyonu devam ettirilmiştir. 2 saatin sonunda madde ayırma hunisine alınarak gliserin ve yağ esterlerinin faz ayrışması için 24 saatlik bir bekleme süresine tabi tutulmuştur. Bekleme süresinin bitiminde Şekil 3.7(a)'daki gibi yoğunluğu fazla olan gliserinin alt fazı oluşturduğu görülmüştür. Ayırma hunisinin vanası açılarak alt faz yani gliserin fazı alınmıştır. Her ne kadar reaksiyon sonunda gliserin fazı ayrılmış olsa da gliserin, tuz ve artık metanol biyodizel fazında bulunmaktadır. Biyodizel içerisinde homojen olarak karışan bu maddeleri, biyodizel içinden ayırtmak için Şekil 3.7(b)'deki yıkama işlemine tabi tutmak gerekmektedir. Gliserin, tuz ve metanol ün ortak özelliği suda çözünüyor olmalarıdır. Yıkama işleminde bu maddeler suda çözünerek alt faza alınır. Bu sayede biyodizelden ayrıştırılmış olur. Bu işlemle beraber daha da saflaşan biyodizel son olarak buharlaştırma işlemine tabi tutulmuştur. Sonra Şekil 3.8'deki ürün, filtrelenerek depolanmıştır.



(a)

(b)

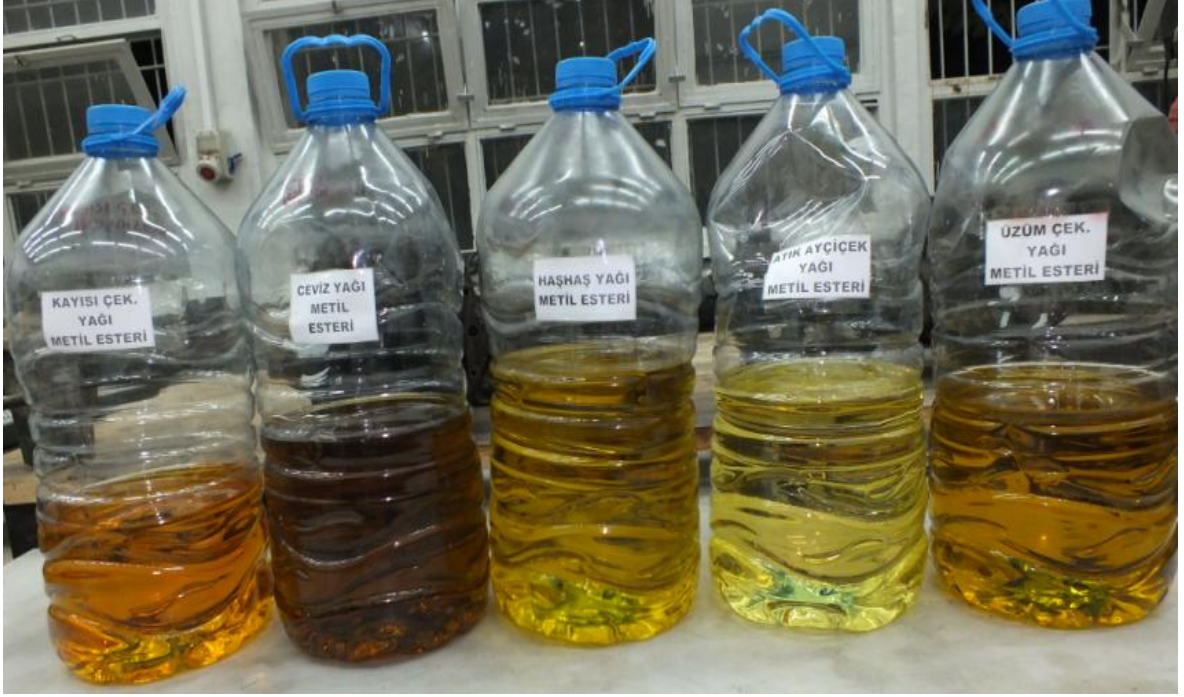
**Şekil 3.7.** Ceviz yağı için; (a) faz ayrışması, (b) yıkama işlemi



**Şekil 3.8.** Ceviz yağı ve elde edilen CYME

### **3.5. Test Yakıtlarının Hazırlanması**

Kimyasal çalışmanın neticesinde elde edilen biyodizel yakıtları, dizel yakıt ile dereceli beherde hacimsel olarak %20, %35, %50, %75 ve %100 oranlarında karıştırılmak suretiyle numuneler hazırlanmıştır. Hazırlanan yakıt numunelerinin son hali Şekil 3.9’da gösterilmiştir.



Şekil 3.9. Üretim sonrası elde edilen metil esterler

### 3.6. Yakıt Katkılarının Özelliklerinin İncelenmesi

Dizel veya biyodizel yakıtlarına ilave edilen katkı maddelerinin yanma reaksiyonunda katalizör olarak görev yaparak yanma verimini iyileştirdiği bilinmektedir. Özellikle de biyodizel yakıtlarının viskozite, yoğunluk, parlama noktası ve donma noktası gibi özelliklerini iyileştirmek amacıyla, katkı maddesi kullanılması kaçınılmaz bir ihtiyaç olmuştur. Dizel motorlarda kullanılan her yakıtın kimyasal bağ yapısı farklıdır. Yakıtların farklı özelliklere sahip olmaları nedeniyle katkı maddesi araştırmaları geniş bir yelpazede gerçekleştirilmiştir.

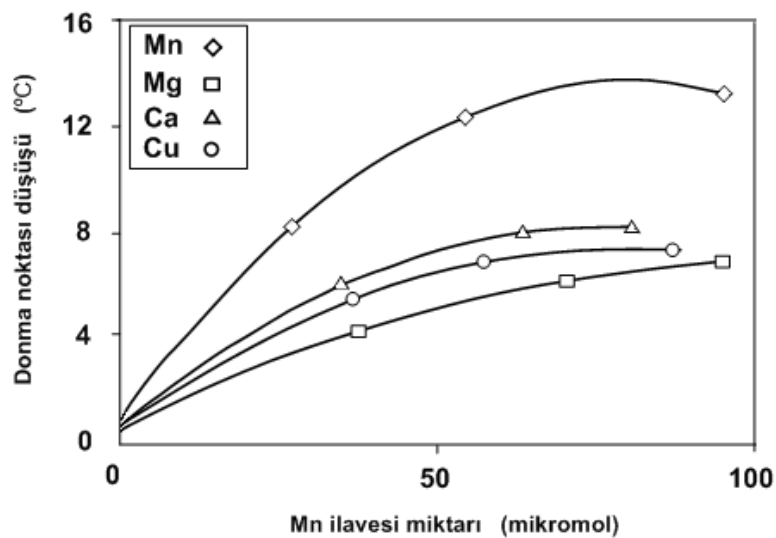
#### 3.6.1. Manganın Katkı Maddesi olarak İncelenmesi

Mangan (Manganez); simgesi Mn, atom numarası 25, periyodik cetveldeki yeri 7-B ve grimsi metal renkte olan önemli bir metaldir. Doğada yapısal olarak inorganik halde bulunan Mn, pirolusit adı verilen ve siyah renkte bulunan  $MnO_2$  minareli ile en önemli yapısını teşkil eder.  $MnO_2$  oksidi bazik olup zayıf asitlerde mangan tuzlarını verecek şekilde çözünür [57].

Manganın en önemli kullanım alanı, genellikle demir-çelik üretim tesisleridir. Mangan içeriğinde bol miktarda karbon atomu içermesi nedeniyle demir üretimindeki en önemli alaşım ögesidir. Demirin çekme direncini arttırmak için %1 oranında kullanılmaktadır. Mangan demir-çelik sanayinde, gübre fabrikalarında vb. birçok sektörde kullanıldığı gibi, yakıt katkı maddesi olarak da değerlendirilmektedir.

Yakıt katkı maddesi olarak Mg, Ca, Cu ve Mn'nin organik bileşiklerinin kullanıldığı bir çalışmada, mangan içerikli yakıt katkı maddesinin dizel yakıt üzerine ilavesiyle yakıtın kimyasal özelliklerini (viskozite parlama noktası) iyileştirmesinin yanı sıra, yakıtın fiziksel özellikleri(donma noktası) üzerinde de etkili olduğu görülmüştür. Mn bazlı katkı maddesinin donma noktasını düşürme hususunda diğer katkılara kıyasla ne kadar etkin olduğu Şekil 3.10'da sunulmuştur. [19].

Yukarıda isimleri belirtilen metal bazlı yakıt katkı maddeleriyle yapılan çalışmalarda etkili sonuçlar elde edilmesine rağmen, biyodizel yakıtına ilave edilen metal bazlı katkı maddeleri en uygun dozlama oranının üzerinde yakıtı ilave edildiğinde numunenin fiziksel ve kimyasal özelliklerini iyileştirmediği hatta olumsuz etkilediği görülmüştür. Bir diğer deyişle, metal bazlı katkı maddelerinin yakıtı ilave edilme oranının bir optimum değerinin olduğu, bu değerın üzerine çıkıldığında ise, yoğunluk, viskozite ve parlama noktası gibi özelliklerinin olumsuz bir şekilde etkilendiği görülmüştür. Bu nedenle, metal bazlı katkı maddesinin en uygun oranını belirlendikten sonra, farklı bir katkı maddesi ile yakıtın fiziksel ve kimyasal özelliklerinin desteklenmesi gerektiği amaçlanmıştır.



Şekil 3.10. Yakıtta metal bazlı katkı maddesi ilavesinin donma noktası üzerindeki etkisi

### 3.6.2. Propilen Glikolün Katkı Maddesi Olarak İncelenmesi

Propilen glikol, kimyasal formülü  $C_3H_8O_2$ , donma noktası  $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ , parlama noktası  $98,9\text{ }^{\circ}\text{C}$ , yoğunluğu  $1,036\text{ kg/lt}$ , viskozitesi  $4,2\text{ mm}^2/\text{sn}$ , kaynama noktası  $170\text{ }^{\circ}\text{C}$  olan tatsız ve renksiz bir solvent türüdür. Özellikle donma noktasının düşük olması itibariyle piyasada satılmakta olan antifirizlerin ana maddesini oluşturmaktadır. Yapısı itibariyle su, alkol, yağ, ester ve ketonla her oranda homojen olarak karışır.

Biyodizel yakıtlarının akma noktalarının dizel yakıtı oranla yüksek olması, soğuk iklim şartlarında birçok soruna neden olmaktadır. Bu sorunlar başlıca; yakıtın depoda donması, ilk çalıştırma sırasında motorun çalışmaması, yakıtın yanma odasında kötü atomize olması gibi sebepler olarak sıralanabilir. Bu sorunların soğuk havalarda motor performans ve emisyon değerlerini olumsuz etkileyeceği bilinmektedir. Bu bağlamdan yola çıkarak biyodizel yakıtına propilen glikol maddesi ilave edilerek donma noktası değerinin düşürülmesi hedeflenmiştir. Diğer bir ilave edilme sebebi ise, metal bazlı katkı maddelerinin yakıtı ilave edilme oranının optimum değerini yakalayıp, bu iyileşmeyi propilen glikol ile desteklemektir.

### 3.6.3. Dodekanolün Katkı Maddesi Olarak Kullanımının İncelenmesi

Yapısal formülü  $CH_3(CH_2)_{10}CH_2OH$  olup, erime noktası  $26\text{ }^{\circ}\text{C}$ , kaynama noktası  $259\text{ }^{\circ}\text{C}$  ve yoğunluğu  $0,8309$  olan alkol türüdür.

Günümüzde, yakıtların içerisine farklı türde birçok katkı maddelerinin ilave edildiği bilinmektedir. İlave edilen katkı maddelerinin bazıları yakıt içerisinde homojen bir yapıda olmamaktadır. Bu duruma önlem almak için, depo içerisine elektrikli fan montaj edilmesi klasik bir yöntemdir. Son zamanlarda bahsedilen soruna çözüm üretmek için, numune içerisine düşük miktarda isopropanol veya dodekanol ilavesi yapılmaktadır. Diğer alkollere oranla yapısında daha fazla karbon atomu bulunduran dodekanolün (lauril alkol) yakıt numunesine ilavesiyle, faz ayrışmasının önüne geçilmektedir [58].

Depo içerisine elektrikli fan yerleştirilmesi mevcut sistemde bir modifikasyon niteliğinde olduğu için bu yöntemin yerine yakıt numunesine düşük oranda (%1) dodekanol ilavesi gerçekleştirilmiştir. Çalışmada kullanılan yakıt katkı maddelerinin görüntüsü Şekil 3.11’de verilmiştir.



Şekil 3.11. Çalışmada kullanılan yakıt katkı maddeleri (Mn, dodekanol ve propilen glikol)

### 3.7. Katkılı karışımların hazırlanması

Katkılı karışımlarda ise; 1lt (%50) dizel yakıtı ile 1lt (%50) biyodizel yakıtı karıştırılıp, üzerine 20ml (%1) dodekanol, 100ml (%5) propilen glikol ve Mn katkısı ise her metil ester numune için farklı dozlarda (20–40–60  $\mu\text{mol/l}$ ) ilave edilerek hazırlanmıştır.

Dizel ve biyodizel yakıtlarının özelliklerini geliştirmek amacıyla kimyasal ortamda yakıt numuneleri içerisine farklı konsantrasyonlarda katkı maddeleri ilave edilmiştir. Farklı özellikteki yakıt numunelerine katkı maddeleri ilave edilerek en iyi fiziksel ve kimyasal özellikleri elde edilmek hedeflenmiştir. Kullanılan metil esterlerle daha önce metal bazlı bir çalışma yapılmadığı için dozlama miktarı geniş bir aralıkta denenmiştir. Ve her katkılı yakıt numunesine %5 propilen glikol ve %1 dodekanol ilave edilmiştir. Her numunenin dizel motordaki performansı ayrı ayrı test edilmiştir. Hazırlanan yakıt numunelerinin kısaltılmış isimleri ve içerik bilgileri detaylı bir Tablo 3.3-3.8’de sunulmuştur.

**Tablo 3.3.** Hazırlanan yakıt numunelerinin kısaltılmış isimleri ve içerik bilgileri

| Yakıtın Kısa Adı               | Test Yakıtlarının İçeriği                                                                                         |
|--------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| D                              | %100 Dizel yakıtı                                                                                                 |
| %20 ÜÇYME + %80 D              | %20 Üzüm Çekirdeği Yağı Metil Esteri + %80 Dizel Yakıtı                                                           |
| %35 ÜÇYME + %65 D              | %35 Üzüm Çekirdeği Yağı Metil Esteri + %65 Dizel Yakıtı                                                           |
| %50 ÜÇYME + %50 D              | %50 Üzüm Çekirdeği Yağı Metil Esteri + %50 Dizel Yakıtı                                                           |
| %75 ÜÇYME + %25 D              | %75 Üzüm Çekirdeği Yağı Metil Esteri + %25 Dizel Yakıtı                                                           |
| %100 ÜÇYME                     | %100 Üzüm Çekirdeği Yağı Metil Esteri                                                                             |
| %50 ÜÇYME<br>+ %50D+20Mn+ D+PG | %50 Üzüm Çekirdeği Yağı Metil Esteri + %50 Dizel Yakıtı<br>+ 20 µmol/lit Mn + %1 Dodekanol + %5 Propilen Glikol   |
| %50 ÜÇYME<br>+ %50 D+40Mn+D+PG | %50 Üzüm Çekirdeği Yağı Metil Esteri + %50 Dizel Yakıtı<br>+ 40 µmol/lit Mn + %1 Dodekanol + %5 Propilen Glikol   |
| %50 ÜÇYME<br>+ %50 D+60Mn+D+PG | %50 Üzüm Çekirdeği Yağı Metil Esteri + %50 Dizel Yakıtı<br>+ 60 µmol/lit Mn + %1 Dodekanol + %5 Propilen Glikol   |
| %20 KÇYME + %80 D              | %20 Kayısı Çekirdeği Yağı Metil Esteri + %80 Dizel Yakıtı                                                         |
| %35 KÇYME + %65 D              | %35 Kayısı Çekirdeği Yağı Metil Esteri + %65 Dizel Yakıtı                                                         |
| %50 KÇYME + %50 D              | %50 Kayısı Çekirdeği Yağı Metil Esteri + %50 Dizel Yakıtı                                                         |
| %75 KÇYME + %25 D              | %75 Kayısı Çekirdeği Yağı Metil Esteri + %25 Dizel Yakıtı                                                         |
| %100 KÇYME                     | %100 Kayısı Çekirdeği Yağı Metil Esteri                                                                           |
| %50 KÇYME<br>+ %50 D+20Mn+D+PG | %50 Kayısı Çekirdeği Yağı Metil ester + %50 Dizel Yakıtı<br>+ 20 µmol/lit Mn + %1 Dodekanol + %5 Propilen Glikol  |
| %50 KÇYME<br>+ %50 D+40Mn+D+PG | %50 Kayısı Çekirdeği Yağı Metil Esteri + %50 Dizel Yakıtı<br>+ 40 µmol/lit Mn + %1 Dodekanol + %5 Propilen Glikol |
| %50 KÇYME<br>+ %50 D+60Mn+D+PG | %50 Kayısı Çekirdeği Yağı Metil Esteri + %50 Dizel Yakıtı<br>+ 60 µmol/lit Mn + %1 Dodekanol + %5 Propilen Glikol |
| %20 HYME + %80 D               | %20 Haşhaş Yağı Metil Esteri + %80 Dizel Yakıtı                                                                   |
| %35 HYME + %65 D               | %35 Haşhaş Yağı Metil Esteri + %65 Dizel Yakıtı                                                                   |
| %50 HYME + %50 D               | %50 Haşhaş Yağı Metil Esteri + %50 Dizel Yakıtı                                                                   |
| %75 HYME + %25 D               | %75 Haşhaş Yağı Metil Esteri + %25 Dizel Yakıtı                                                                   |
| %100 HYME                      | %100 Haşhaş Yağı Metil Esteri                                                                                     |
| %50 HYME<br>+ %50 D+20Mn+D+PG  | %50 Haşhaş yağı metil ester + %50 Dizel Yakıtı<br>+ 20 µmol/lit Mn + %1 Dodekanol + %5 Propilen Glikol            |

**Tablo 3.3. (Devam)**

| Yakıtın Kısa Adı               | Test Yakıtlarının İçeriği                                                                                    |
|--------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| %50 HYME<br>+ %50 D+40Mn+D+PG  | %50 Haşhaş yağı metil esteri + %50 Dizel Yakıtı<br>+ 40 µmol/l Mn + %1 Dodekanol + %5 Propilen Glikol        |
| %50 HYME<br>+ %50 D+60Mn+D+PG  | %50 Haşhaş yağı metil esteri + %50 Dizel Yakıtı<br>+ 60 µmol/l Mn + %1 Dodekanol + %5 Propilen Glikol        |
| %20 CYME + %80 D               | %20 Ceviz Yağı Metil Esteri + %80 Dizel Yakıtı                                                               |
| %35 CYME + %65 D               | %35 Ceviz Yağı Metil Esteri + %65 Dizel Yakıtı                                                               |
| %50 CYME + %50 D               | %50 Ceviz Yağı Metil Esteri + %50 Dizel Yakıtı                                                               |
| %75 CYME + %25 D               | %75 Ceviz Yağı Metil Esteri + %25 Dizel Yakıtı                                                               |
| %100 CYME                      | %100 Ceviz Yağı Metil Esteri                                                                                 |
| %50 CYME<br>+ %50 D+20Mn+D+PG  | %50 Ceviz Yağı Metil Esteri + %50 Dizel Yakıtı +<br>20 µmol/l Mn + %1 Dodekanol + %5 Propilen Glikol         |
| %50 CYME<br>+ %50 D+40Mn+D+PG  | %50 Ceviz yağı Metil Esteri + %50 Dizel Yakıtı +<br>40 µmol/l Mn + %1 Dodekanol + %5 Propilen Glikol         |
| %50 CYME<br>+ %50 D+60Mn+D+PG  | %50 Ceviz Yağı Metil Esteri + %50 Dizel Yakıtı +<br>60 µmol/l Mn + %1 Dodekanol + %5 Propilen Glikol         |
| %20 AAYME + %80 D              | %20 Atık Ayçiçeği Yağı Metil Esteri + %80 Dizel Yakıtı                                                       |
| %35 AAYME + %65 D              | %35 Atık Ayçiçeği Yağı Metil Esteri + %65 Dizel Yakıtı                                                       |
| %50 AAYME + %50 D              | %50 Atık Ayçiçeği Yağı Metil Esteri + %50 Dizel Yakıtı                                                       |
| %75 AAYME + %25 D              | %75 Atık Ayçiçeği Yağı Metil Esteri + %25 Dizel Yakıtı                                                       |
| %100 AAYME                     | %100 Atık Ayçiçeği Yağı Metil Esteri                                                                         |
| %50 AAYME<br>+ %50 D+20Mn+D+PG | %50 Atık Ayçiçeği Yağı Metil Esteri + %50 Dizel Yakıtı +<br>20 µmol/l Mn + %1 Dodekanol + %5 Propilen Glikol |
| %50 AAYME<br>+ %50 D+40Mn+D+PG | %50 Atık Ayçiçeği Yağı Metil Esteri + %50 Dizel Yakıtı +<br>40 µmol/l Mn + %1 Dodekanol + %5 Propilen Glikol |
| %50 AAYME<br>+ %50 D+60Mn+D+PG | %50 Atık Ayçiçeği Yağı Metil Esteri + %50 Dizel Yakıtı +<br>60 µmol/l Mn + %1 Dodekanol + %5 Propilen Glikol |

### 3.8. Yakıt Özelliklerinin Kimyasal Analizleri

Yakıt analizlerinin bir kısmı Siirt üniversitesi Kimya Laboratuvarı'nda bir kısmı da İnönü Üniversitesi Petrol Analiz Laboratuvarında (PAL) gerçekleştirilmiştir. Her analiz üç kez tekrarlanmış olup, farklılığın  $\pm$  %3 civarında olduğu görülmüştür. Aşağıdaki tablolarda sunulmuş olan değerler üç değerın ortalaması hesaplanarak tespit edilmiştir. Yapılan analiz sonuçları Tablo 3.4'de sunulmuştur.

**Tablo 3.4.** Dizel ve biyodizel yakıtlarının fiziksel ve kimyasal özellikleri

| <b>Yakıt türü</b> | <b>Yoğunluk<br/>(kg /lt)<br/>(18 °C)</b> | <b>Viskozite<br/>(mm<sup>2</sup> /sn)<br/>(18 °C)</b> | <b>Parlama<br/>noktası (°C)</b> | <b>Donma<br/>noktası (°C)</b> | <b>Setan<br/>sayısı (SS)</b> |
|-------------------|------------------------------------------|-------------------------------------------------------|---------------------------------|-------------------------------|------------------------------|
| Dizel Yakıtı      | 831,9                                    | 3,620                                                 | 78,50                           | -25,0                         | 53,10                        |
| %100 ÜÇYME        | 879,1                                    | 4,656                                                 | 143,7                           | -5,00                         | 58,70                        |
| %100 KÇYME        | 872,7                                    | 4,803                                                 | 151,4                           | -10,2                         | 58,80                        |
| %100 HYME         | 884,8                                    | 4,810                                                 | 162,7                           | -7,00                         | 58,40                        |
| %100 CYME         | 882,6                                    | 4,790                                                 | 157,9                           | -12,2                         | 57,60                        |
| %100 AAYME        | 886,1                                    | 4,942                                                 | 160,8                           | -3,00                         | 59,50                        |

## 4. MOTOR TEST MATERYALLERİ VE METOTLAR

### 4.1. Deney Seti

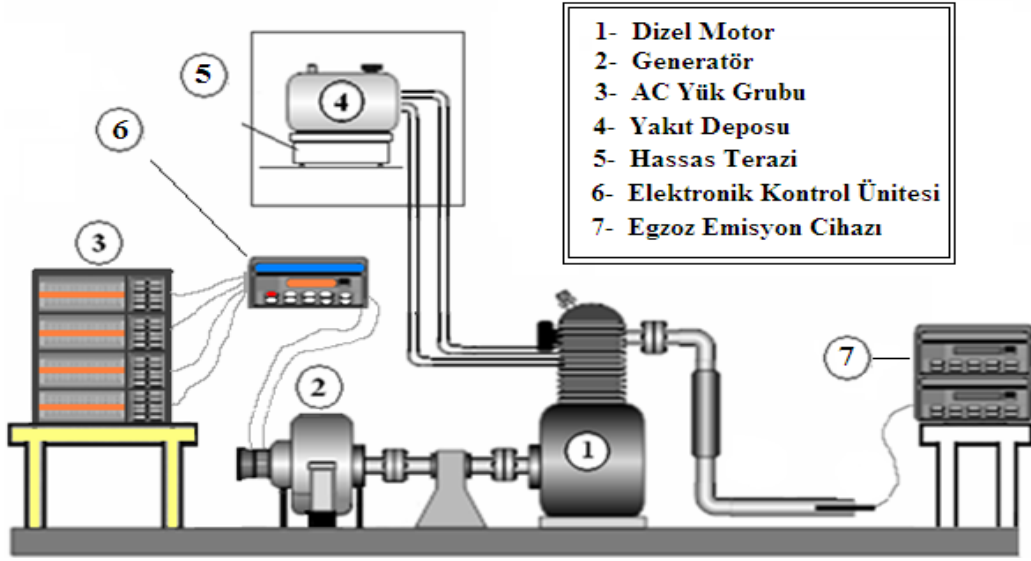
Deney seti, dizel motor, senkron jeneratör, hassas terazi, AC yük grubu, egzoz gazı analiz ve duman ölçüm cihazından oluşmaktadır.

Deneysel çalışma Genpower marka bir dizel jeneratörde gerçekleştirilmiştir. Çalışma esnasında motorda, jeneratörde veya herhangi bir aksamda modifikasyon yapılmamıştır. Aynı standart şartlarda yakıt numuneleri teste tabi tutulmuştur. Tablo 4.1’de dizel motorun teknik özellikleri verilmiştir.

**Tablo 4.1.** Deney motorunun teknik özellikleri

|                      |                           |
|----------------------|---------------------------|
| <b>MARKASI</b>       | <b>INTER-IDE314NG</b>     |
| Püskürtme sistemi    | Direkt püskürtmeli        |
| Soğutma sistemi      | Radyatör ile su soğutmalı |
| Silindir sayısı      | 3                         |
| Çap x Strok          | 80 x 90                   |
| Strok hacmi (lt)     | 1,4                       |
| Sıkıştırma oranı     | 18/1                      |
| Maksimum Güç (kW/HP) | 13,5 / 18                 |

Deney düzeneğinin şematik görüntüsü Şekil 4.1’de, test düzeneği Şekil 4.2’de verilmiştir.



Şekil 4.1. Deney düzeneğinin şematik görüntüsü



Şekil 4.2. Deneylerin yapıldığı test düzeneği

Deneylerde motorun yüklenmesi için maksimum aktif gücü 12,5 kW olan senkron bir jeneratör kullanılmıştır. Tablo 4.2’de teknik özellikleri sunulmuştur. Kontrol cihazı yardımı ile jeneratöre, dolayısıyla motora, yük kademeli olarak (0–12,5 kW aralığında) istenilen değerde uygulanabilmektedir.

**Tablo 4.2.** Deneylerde kullanılan jeneratörün teknik özellikler

| MARKASI           | GENPOWER (GNT 13)          |
|-------------------|----------------------------|
| Tipi              | Senkron-Fırçasız           |
| Aktif Gücü        | 12,5 KW                    |
| Akım Dağılımı     | L1 - L2 -L3                |
| Gerilimi          | 231/400 V                  |
| Gerilim Toleransı | 0,5                        |
| Dayanımı          | 2U+1000V Minimum 1800 Volt |
| İzolasyon Sınıfı  | H                          |

#### 4.1.1. Egzoz Emisyon Ölçüm Cihazı

Deneylerde egzoz gazlarının analizi için CAPELEC CAP 3200 gaz analiz cihazı kullanılmıştır. Bu cihaz hacimsel olarak HC ve NO<sub>x</sub> 'i ppm cinsinden CO, CO<sub>2</sub> ve O<sub>2</sub>'yi % cinsinden tespit etmektedir. Şekil 4.3'de egzoz emisyon cihazı, Tablo 4.3'de de hassasiyet özellikleri verilmiştir.



**Şekil 4.3.** Egzoz emisyon ölçüm cihazı

**Tablo 4.3.** Egzoz emisyon ölçüm cihazının ölçüm aralığı ve hassasiyet değerleri

| Parametre       | Ölçme aralığı | Ayırıcılık |
|-----------------|---------------|------------|
| HC              | 0 – 20000 ppm | 1 ppm      |
| CO              | 0 – 15 %      | 0,001 %    |
| CO <sub>2</sub> | 0 – 20 %      | 0,1 %      |
| O <sub>2</sub>  | 0 – 21,7 %    | 0,01 %     |
| NO <sub>x</sub> | 0 – 5000 ppm  | 1 ppm      |

#### 4.1.2. Duman Ölçüm Cihazı

Duman ölçümü için CAP 3200 D dizel duman ölçer kullanılmıştır. LCD grafik ekranlıdır. Bu cihaz egzoz gazlarındaki duman koyuluğunu hem (%) hem (m–1) cinsinden ölçebilmektedir. Cihazın ölçüm aralığı ve hassasiyeti Tablo 4.4’de deney düzeneğindeki konumu ise Şekil 4.4.’de verilmiştir.

**Tablo 4.4.** Duman ölçüm cihazı ölçüm aralığı ve hassasiyet değerleri

| PARAMETRE | ÖLÇME ARALIĞI               | AYIRICILIK           |
|-----------|-----------------------------|----------------------|
| N         | 0 – 100 %                   | 0,1 %                |
| K         | 0,00 – 9,99 m <sup>-1</sup> | 0,01 m <sup>-1</sup> |



**Şekil 4.4.** Çalışmadaki duman ölçüm cihazının görüntüsü

#### **4.1.3. Egzoz gazı sıcaklık ölçümü**

Sıcaklık ölçümünde; 180 gr ağırlığında, -30, 380 °C aralığında ölçüm yapan, 1 °C hassasiyetinde kızılötesi bir termometre kullanılmıştır. Şekil 4.5’de egzoz gazı sıcaklık ölçümü için kullanılan cihazın görüntüsü verilmiştir.



**Şekil 4.5.** Deneylerde kullanılan kızılötesi termometre

#### **4.2. Yöntem**

Deneylere başlamadan önce yağlama yağının değişimi, hava filtresinin temizlenmesi gibi bir takım rutin motor bakımları yapılmıştır. Motorun yakıt enjektörleri sökülerek kontrolleri yapılmıştır. Tüm yakıt testleri motorda herhangi bir modifikasyon yapılmadan

gerçekleştirilmiştir. Motor standart dizel yakıt ile bir süre yüksüz çalıştırılmış ve sonra motor optimum çalışma sıcaklığına geldikten sonra motora 2,5 kW (%20) – 5 kW (%40) – 7,5 kW (%60) – 10 kW (%80) değerdeki 4 ayrı kademede yük uygulanmıştır. Bu işlem iki defa tekrar edilmiş ve ölçülen değerlerin ortalaması hesaplanmıştır. Bir yakıt türü için ölçümler tamamlandıktan sonra motor durdurulup, bir süre beklendikten sonra diğer yakıt türü ile çalışmaya geçilmiştir. Deneysel çalışmada yukarıda belirtilen değişken yük değerlerinde özgül yakıt tüketimi (gr/kW.h), HC (ppm), CO (%), CO<sub>2</sub> (%), O<sub>2</sub> (%), NO<sub>x</sub> (ppm), egzoz çıkış sıcaklığı (°C) ve duman (is) değerleri ölçülmüştür.

## **5. DENEYSEL BULGULAR VE TARTIŞMA**

Bu bölümde biyodizel ve katkı ilaveli yakıtların, sabit hız ve değişken yükteki performans ve emisyon değerleri incelenmiştir. Ölçülen ve hesaplanan değerler tablo ve grafik halinde verilmiştir.

### **5.1. ÜÇYME İçin Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi**

Üzüm çekirdeğinden elde edilen biyodizeller (ÜÇYME), belli oranlarda dizel yakıtı ile karıştırılarak beş farklı yakıt numunesi elde edilmiştir. Ayrıca B50 yakıtına farklı özellikteki katkı maddeleri ilave edilerek elde edilen yakıt numunelerin, ÖYT ve egzoz emisyon değerleri test edilmiştir. Test işleminin sonunda elde edilen değerler karşılaştırmalı bir şekilde aşağıda sunulmuştur.

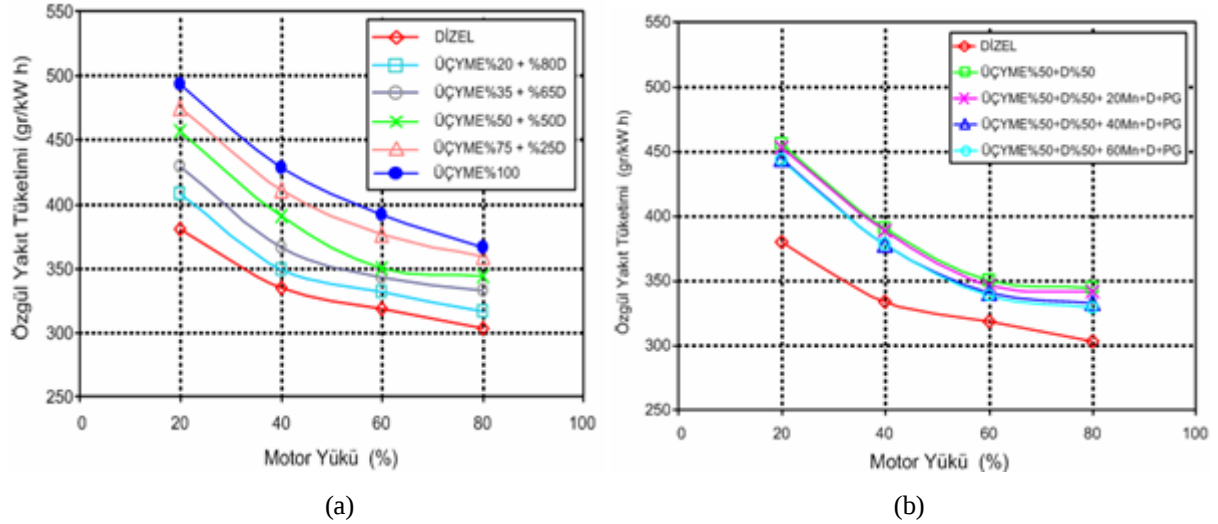
#### **5.1.1. ÜÇYME İçerikli Yakıt Numunelerinin Özgül Yakıt Tüketimi Analizi**

Özgül yakıt tüketimi, birim güç başına tüketilen kütleli yakıt miktarı olarak tanımlanmaktadır.

Bu çalışmada, sabit yükte, devir değişimine bağlı özgül yakıt tüketimi (ÖYT) ölçümü yerine, sabit hızda, yük değişimine bağlı ÖYT ölçümü gerçekleştirilmiştir. Test motoru, 1500 dev/dak.'lık sabit hızda, %20, %40, %60 ve %80 değişken yük şartlarında çalıştırılarak ÖYT değerleri ölçülmüştür. Motor devri, motor test düzeneğinde bulunan elektronik hız kontrol ünitesiyle sabit tutulmuştur. Elektronik hız kontrol ünitesi, motor devrini sabit tutmak için, yükün artışına bağlı olarak tüketilecek yakıtın miktarını otomatik olarak arttırmaktadır.

**Tablo 5.1.** ÜÇYME yakıt türlerinin değişken yükteki ÖYT değerleri

| Yakıt türü    | ÖYT değeri (gr/kWh) |      |      |      |
|---------------|---------------------|------|------|------|
|               | % 20                | % 40 | % 60 | % 80 |
| DY            | 380                 | 334  | 318  | 303  |
| B20           | 408                 | 349  | 331  | 316  |
| B35           | 431                 | 366  | 343  | 332  |
| B50           | 456                 | 390  | 350  | 344  |
| B75           | 475                 | 411  | 376  | 359  |
| B100          | 493                 | 428  | 391  | 366  |
| B50+20Mn+D+PG | 453                 | 388  | 346  | 341  |
| B50+40Mn+D+PG | 444                 | 378  | 340  | 333  |
| B50+60Mn+D+PG | 443                 | 378  | 338  | 329  |



**Şekil 5.1.** ÜÇYME için hazırlanan yakıt türlerinin ÖYT emisyonlarının değişimi;

(a) Biyodizel içerikli numuneler, (b) Katkı maddeli numuneler

ÜÇYME'den hazırlanan B20, B35, B50, B75 ve B100 yakıtlarının ÖYT değerleri, dizel yakıtın değerleriyle karşılaştırılmıştır. Ölçülen ÖYT değerleri Tablo 5.1'de sunulmuştur. Biyodizel yakıtlarının ÖYT değerleri, dizel yakıtının değerleriyle kıyaslandığında; B20 yakıtında % 5, B35 yakıtında % 9.1, B50 yakıtında % 13.3, B75 yakıtında % 17.7 ve B100 yakıtında % 20.4 oranında bir artış tespit edilmiştir.

Şekil 5.1(a)'da görüldüğü gibi tüm yakıt türleri arasında en düşük özgül yakıt tüketiminin dizel yakıtı kullanıldığında, en yüksek özgül yakıt tüketiminin de B100 kullanıldığında elde edilmiştir. Test yakıtlarının ÖYT değerleri, dizel yakıtı içerisindeki

biyodizel miktarının artmasıyla orantılı bir şekilde artmaktadır. Biyodizel yakıtının; ısıl değerinin düşük, viskozite ve yoğunluk değerlerinin yüksek olması, ÖYT değerlerinin yüksek değerde çıkmasına sebep olduğu düşünülmektedir. Şekil 5.1(a)'da görüldüğü gibi, aynı yük şartlarında test edilen dizel ve biyodizel yakıtları aynı gücü üretmelerine rağmen biyodizel yakıtının ÖYT değeri dizel yakıtına kıyasla daha yüksektir. Belirtilen bu durum üç nedene bağlanmıştır. Birinci neden, formüsel olarak da hesaplanabileceği üzere, birbirleri arasındaki yoğunluk farkıdır. Çünkü enjeksiyon pompası yakıtları hacimsel olarak ölçerek silindirlere göndermektedir. Biyodizelin yoğunluğunun dizel yakıtına göre yüksek olmasından dolayı kütsel yakıt tüketimi, biyodizel yakıtlarında yüksek değerde çıkmaktadır. Diğer bir deyişle, yoğunluğu yüksek olan yakıt numunesinin silindirlere gönderilen gram cinsinden değeri fazladır. Yoğunluğu yüksek değerde olan yakıt numunelerinde ÖYT değerlerinin yüksek çıkması kaçınılmaz bir sonuçtur. İkinci neden ise; test yakıtları arasındaki viskozite farklılığıdır. Yüksek viskoziteye sahip yakıtlar aynı enjektör basıncıyla ve aynı enjektör memesinin delik çapından püskürtüldüğünde daha iri taneli olarak yanma odasına giriş yapmaktadır. Bu durumda yakıt molekülleri, sıkıştırılmış hava ile iyi bir karışım gerçekleştiremeyecektir. Sonuç olarak, yakıtın buharlaşma ve yanma verimi olumsuz etkilenecektir. Bu durum harcanan yakıt miktarını arttıracığından, ÖYT değerlerini de o oranda yükselecektir [24,59]. ÖYT'yi etkileyen faktörlerden bir diğeri ise yakıtın ısıl değeridir. Her yakıt numunesi için aynı yük şartlarında test yapıldığında, yanma reaksiyonunun sonunda aynı ısıl enerji elde edilmesi gerekir. Eşit ısı enerjisi sağlayabilmek için, dizel yakıtına kıyasla biyodizel yakıtından kütsel olarak daha fazla yanma odasına alınması gerekir. Ancak bu şartlarda yakıtlar arası enerji eşdeğerliği sağlanmış olabilir. Bu durum ise, biyodizel yakıtlarında daha fazla yakıt tüketimine sebep olmaktadır. Sonuç olarak, püskürtülen yakıtın; yoğunluğu, viskozitesi ve ısıl değeri ÖYT doğrudan etkileyen unsurlardır [12,56,60,61].

B50 yakıtının ÖYT değerleri, katkı ilaveli yakıtlarının ÖYT değerleriyle karşılaştırılmıştır. Ölçülen ÖYT değerleri Tablo 5.1'de sunulmuştur. Katkı ilaveli yakıtların ÖYT değerleri, B50 yakıtının değerleriyle kıyaslandığında; B50+20Mn $\mu$ mol/lit+PG yakıtında %1, B50+40Mn $\mu$ mol/lit+PG yakıtında %3, B50+60Mn $\mu$ mol/lit+PG yakıtında % 3.05 oranında bir azalma tespit edilmiştir.

Katkı maddelerin, ilave edildikleri yakıtların ÖYT değerlerinin azalmasına katkı sağladığı Şekil 5.1(b)'den görülmektedir. Katkı maddelerinin yakıt numunelerinde; setan sayısı, viskozite, yoğunluk ve parlama noktası gibi özellikleri iyileştirmesinin ve ayrıca yanma reaksiyonunda katalizör olarak görev yapmasının, neticesinde ÖYT değerlerinin

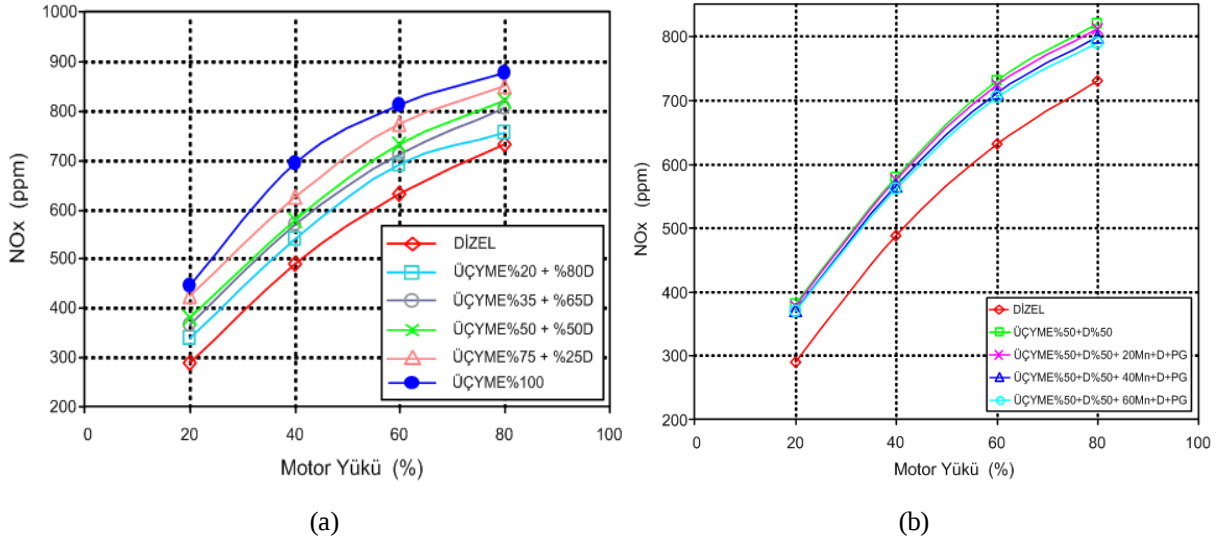
azaldığı düşünülmektedir. Ayrıca, B50 yakıtına ilave edilen Mn bazlı katkı maddesi miktarlarının artışına bağlı olarak ÖYT değerinin daha da azaldığı Şekil 5.1(b)'den görülmektedir. Metal bazlı katkı maddesinin yakıtta ilave edilmesinin; setan sayısı, viskozite ve parlama noktası gibi özelliklere olumlu yönde katkı sağladığı belirtilmiştir [24-27]. Fakat metal bazlı katkı maddelerinin yakıtta ilave edilme oranının bir optimum değerinin olduğu, bu değer in üzerine çıkıldığında ise, setan sayısı, yoğunluk, viskozite ve parlama noktası gibi özelliklerinin olumsuz bir şekilde etkilendiği de ayrıca belirtilmiştir [27]. ÜÇYME'den hazırlanan B50 yakıtına, 20,40 ve 60 µmol/lit ölçeğinde Mn dozlaması yapılmıştır. Belirtilen bu ölçekler arasında, en iyi performansın 40 µmol/lit ölçeğindeki Mn kullanımında gerçekleştiği Şekil 5.1(b)'den görülmektedir. Her ne kadar biyodizel yakıtlarının karbon, hidrojen ve oksijen oranları birbirlerine benzer değerlerde olsa da, Tablo 3.1'deki yağ asit kompozisyonu değerlerinden görüldüğü gibi kimyasal bağ yapıları birbirlerinden farklıdır. Bu sebeple, Mn bazlı katkı maddesinin en uygun dozlama miktarının değişken değerlerde olması beklenen bir durumdur. Yapılan motor testleri neticesinde, Mn bazlı katkı maddesinin yakıtta ilave edilme oranındaki optimum değerin 40 µmol/lit olduğu Şekil 5.1(b)'den görülmektedir.

### 5.1.2. ÜÇYME İçerikli Yakıt Numunelerinin NO<sub>x</sub> Emisyonları Analizi

NO<sub>x</sub>'ler genellikle, motorun yüksek sıcaklıklardaki çalışma şartlarında oluşmaktadır. NO<sub>x</sub> terimi NO ve NO<sub>2</sub>'nin atmosferdeki toplam yoğunluğunun ifadesidir. Dizel motorlar yanma reaksiyonunu oluştururken diğer motor tiplerine göre daha fazla hava kullanmaktadır. Kullanılan havanın içeriğindeki oksijen, aşırı sıcak çalışma şartlarında ve yanma için yeterli zaman oluştuğunda, azot ile reaksiyona girer. Bu reaksiyon sonucunda NO<sub>x</sub> emisyonları oluşur. NO<sub>x</sub> genellikle, kontrolsüz yanma aşamasında meydana gelmektedir. Biyodizelin oksijen içeriği nedeniyle dizel yakıtta kıyasla daha yüksek NO<sub>x</sub> salınımına sebebiyet vereceği belirtilmiştir. Biyodizel ile çalışan motorlarda silindir içi basıncın ve sıcaklık değerlerinin yüksek oluşu, NO<sub>x</sub> emisyonu oluşmasına neden olarak gösterilmiştir [62-64]. NO<sub>x</sub> oluşumu büyük oranda silindir içi sıcaklığa, basınca, tutuşma gecikmesi ve yanma süresine bağlıdır [65-67].

**Tablo 5.2.** ÜÇYME yakıt türlerinin değişken yükteki NO<sub>x</sub> değerleri

| Yakıt türü    | NO <sub>x</sub> emisyonu (ppm) |      |      |      |
|---------------|--------------------------------|------|------|------|
|               | % 20                           | % 40 | % 60 | % 80 |
| DY            | 290                            | 488  | 632  | 731  |
| B20           | 340                            | 540  | 689  | 756  |
| B35           | 365                            | 569  | 712  | 806  |
| B50           | 380                            | 579  | 730  | 820  |
| B75           | 425                            | 625  | 773  | 850  |
| B100          | 444                            | 693  | 810  | 877  |
| B50+20Mn+D+PG | 377                            | 576  | 724  | 811  |
| B50+40Mn+D+PG | 371                            | 566  | 711  | 799  |
| B50+60Mn+D+PG | 370                            | 561  | 705  | 790  |



**Şekil 5.2.** ÜÇYME için hazırlanan yakıt türlerinin NO<sub>x</sub> emisyonlarının değişimi;

(a) Biyodizel içerikli numuneler, (b) Katkı maddeli numuneler

ÜÇYME'den hazırlanan B20, B35, B50, B75 ve B100 yakıtlarının NO<sub>x</sub> emisyonu değerleri, dizel yakıtın değerleriyle karşılaştırılmıştır. Ölçülen NO<sub>x</sub> emisyonu değerleri Tablo 5.2'de sunulmuştur. Biyodizel yakıtları, dizel yakıtının NO<sub>x</sub> emisyonu değerleriyle kıyaslandığında; B20 yakıtında % 8.6, B35 yakıtında % 14.6, B50 yakıtında % 17.2, B75 yakıtında % 24.8 ve B100 yakıtında % 32.1 oranında bir artış tespit edilmiştir.

Şekil 5.2(a)'da görüldüğü gibi, düşük yüklerde silindir içi sıcaklığının düşük olması, bütün test yakıtları için NO<sub>x</sub> emisyonunun düşük çıkmasına neden olmuştur. Motordaki yükün artışı ile NO<sub>x</sub> emisyonlarında da aynı paralelde bir artış gözlemlenmiştir. Yükün

artmasıyla beraber  $\text{NO}_x$  emisyon değerlerindeki bu artış; silindir içi sıcaklığın artması ve daha fazla yakıt tüketiminden kaynaklandığı düşünülmektedir. Şekil 5.8(a)'daki egzoz çıkış sıcaklık değerleri ve Şekil 5.1(a)'daki ÖYT değerleri de bu durumu desteklemektedir. Silindir içi sıcaklığın artması, silindir içi hava hareketliliğini oluşturarak  $\text{NO}_x$  emisyonlarının oluşumuna zemin hazırlamaktadır [64]. Fakat dizel yakıtı içerisindeki biyodizel oranının artmasıyla sıcaklık değerleri daha da yükselmekte, bu yükselmenin neticesinde ise; basınç, hava hareketliliği gibi oluşumların daha hızlı gerçekleştiği düşünülmektedir. Aynı yük şartlarında  $\text{NO}_x$  emisyonu değerleri arasındaki farklılığın bir diğer nedeni ise, yakıt numunelerin ısı değerleri arasındaki farklılıktan kaynaklandığı düşünülmektedir. Biyodizel yakıtlarının, aynı enerjiyi elde edebilmeleri için kütsel olarak daha fazla kullanılması gerekir. Gram cinsinden daha fazla yakıtın kullanılması,  $\text{NO}_x$  emisyonlarının artmasına sebep olarak gösterilebilir.

B50 yakıtının  $\text{NO}_x$  emisyonu değerleri, B50+20Mn+PG, B50+40Mn+PG ve B50+60Mn+PG yakıtlarının  $\text{NO}_x$  emisyonu değerleriyle karşılaştırılmıştır. Ölçülen  $\text{NO}_x$  emisyonu değerleri Tablo 5.2'de sunulmuştur. Katkı ilaveli yakıtlar, B50 yakıtının  $\text{NO}_x$  emisyonu değerleriyle kıyaslandığında; B50+20Mn+PG yakıtında % 0.9, B50+40Mn+PG yakıtında %2.7, B50+60Mn+PG yakıtında %3.5 oranında bir azalma tespit edilmiştir.

Katkı maddelerinin yapısında oksijen bulunması ve egzoz çıkış sıcaklık değerlerinin yüksek olması sebebiyle,  $\text{NO}_x$  emisyonlarının daha yüksek olması beklenmektedir. Ancak beklenenin tersine  $\text{NO}_x$  emisyonu değerlerinde bir düşüş olduğu Şekil 5.2(b)'den görülmektedir. Yakıt numunelerine katkı maddelerinin ilave edilmesiyle, setan sayısının artması, ÖYT değerlerinin ve parlama noktasının düşmesi gibi sebeplerin neticesinde  $\text{NO}_x$  emisyonlarının azalttığı düşünülmektedir. Nitekim hayvansal iç yağı metil esteri ve karışımlarının kullanıldığı bir çalışmada, özgül yakıt tüketimi ve egzoz çıkış sıcaklığı değerlerinin dizel yakıtına göre yüksek olmasına rağmen daha düşük  $\text{NO}_x$  emisyonları elde edilmiştir. Yakıt numunelerinin dizel yakıtına göre yüksek setan sayısına ve daha düşük parlama noktasına sahip olması ile açıklanmıştır. Setan sayısının artması ile  $\text{NO}_x$  emisyonlarının azaldığı da ayrıca vurgulanmıştır [68]. Katkı maddeleri, tutuşma gecikmesini önleyerek azot ile oksijenin reaksiyona gireceği süreyi kısalttığı düşünülmektedir. Katkılı numunelerdeki yanma sürenin kısılması,  $\text{NO}_x$  oluşumunun azalmasına sebep olarak gösterilebilir.

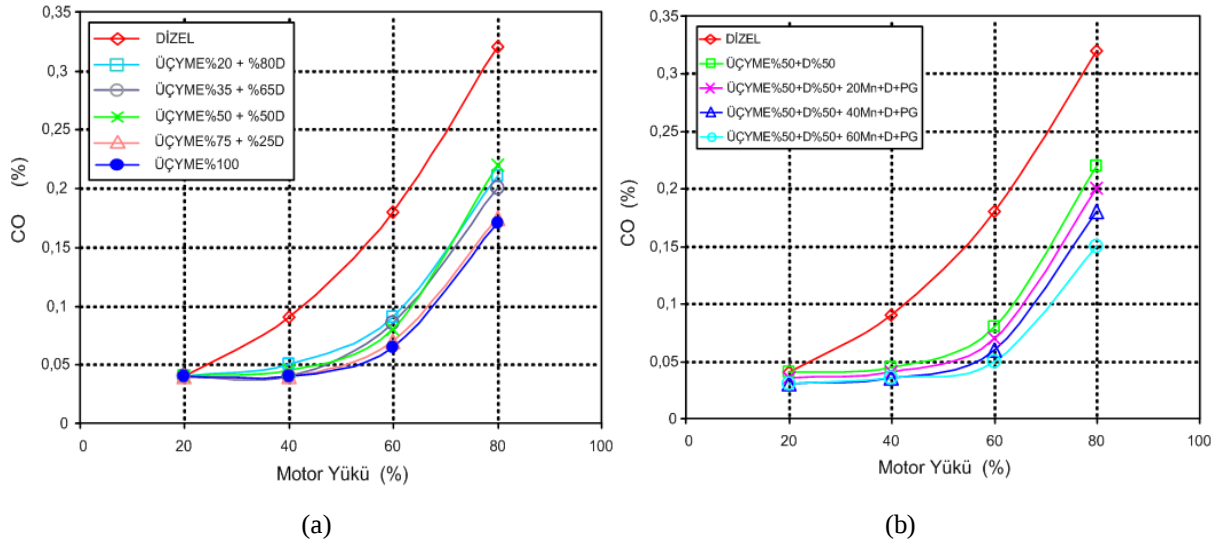
Biyodizel yakıtlarının viskozitelerinin ve parlama noktalarının yüksek olması, tutuşma gecikmesine sebep olmakta, neticesinde azot ile oksijenin reaksiyona girebileceği zaman diliminin oluşturmaktadır [63].

### 5.1.3. ÜÇYME İçerikli Yakıt Numunelerinin Karbon Monoksit (CO) Emisyonları Analizi

CO emisyonlarının oluşumu dizel motorlarda birçok nedene bağlanabilir. Gaz sıcaklığının düşük olması, yeterli oksijenin bulunmaması ve CO<sub>2</sub>'ye dönüşüm için yeterli zamanın kalmamasından dolayı yanmanın tamamlanmamış olması CO miktarını artırır [69]. Biyodizel yakıtının oksijen içermesi, düşük karbon oranı ve yüksek setan sayısı CO emisyonlarındaki azalmanın temel sebepleridir [45,70-76].

**Tablo 5.3.** ÜÇYME için hazırlanan yakıt türlerinin değişken yükteki CO değerleri

| Yakıt türü    | CO emisyonu (%) |       |       |       |
|---------------|-----------------|-------|-------|-------|
|               | % 20            | % 40  | % 60  | % 80  |
| DY            | 0,04            | 0,09  | 0,18  | 0,32  |
| B20           | 0,04            | 0,05  | 0,09  | 0,21  |
| B35           | 0,04            | 0,04  | 0,085 | 0,2   |
| B50           | 0,04            | 0,045 | 0,08  | 0,22  |
| B75           | 0,04            | 0,04  | 0,07  | 0,175 |
| B100          | 0,04            | 0,04  | 0,065 | 0,17  |
| B50+20Mn+D+PG | 0,035           | 0,04  | 0,07  | 0,2   |
| B50+40Mn+D+PG | 0,03            | 0,035 | 0,06  | 0,18  |
| B50+60Mn+D+PG | 0,03            | 0,035 | 0,05  | 0,15  |



**Şekil 5.3.** ÜÇYME için hazırlanan yakıt türlerinin CO emisyonlarının değişimi;

(a) Biyodizel içerikli numuneler, (b) Katkı maddeli numuneler

ÜÇYME'den hazırlanan B20, B35, B50, B75 ve B100 yakıtlarının ölçülen CO emisyonu değerleri, dizel yakıtın değerleriyle karşılaştırılmıştır. Ölçülen CO emisyonu değerleri Tablo 5.3'de sunulmuştur. Biyodizel yakıtları, dizel yakıtının CO emisyonu değerleriyle kıyaslandığında; B20 yakıtında % 33.1, B35 yakıtında % 34, B50 yakıtında % 35, B75 yakıtında % 45 ve B100 yakıtında % 51.1 oranında bir azalma tespit edilmiştir.

Tüm test yakıtları için motordaki yük arttıkça CO emisyonlarının da aynı paralelde arttığı Şekil 5.3(a)'dan görülmektedir. Yükün artmasıyla beraber CO emisyonu değerlerindeki bu artış, kütleli olarak daha fazla yakıt kullanılmasına bağlanmıştır. Yükün artmasıyla beraber gram cinsinden daha fazla yakıt kullanılması CO emisyonlarının artışına sebep olarak gösterilebilir. Biyodizel yakıtlarının CO emisyonlarının, dizel yakıtına göre daha düşük değerlerde olduğu Şekil 5.3(a)'da görülmektedir. Biyodizel yakıtının setan sayısının yüksek olması ve kimyasal bağ yapısında oksijen bulundurması biyodizel yakıtlarının CO emisyonu değerlerindeki azalmaya sebep olduğu düşünülmektedir. Test yakıtlarının CO emisyon değerleri %20 yükte benzer değerde iken, %40, %60, %80 yük şartlarında, yakıtların CO emisyon değerleri arasında belirgin farklılıklar olduğu Şekil 5.3(a)'dan görülmektedir. Dizel yakıtı içerisindeki biyodizel oranının artırılmasıyla, setan sayısı ve oksijen içeriği gibi değerlerin arttığı ve bu durumun ise test yakıtları arasındaki CO emisyonlarının farklı değerlerde oluşmasına sebep olduğu düşünülmektedir. Yakıtların yanma performansını etkileyecek özellikleri ne kadar iyi olursa, CO emisyon değerlerinin de o nispette düşük olacağı düşünülmektedir.

B50 yakıtının CO değerleri de, B50+20Mn+PG, B50+40Mn+PG ve B50+60Mn+PG yakıtlarının CO emisyonu değerleriyle karşılaştırılmıştır. Ölçülen CO emisyonu değerleri Tablo 5.3'de sunulmuştur. Katkı ilaveli yakıtlar, B50 yakıtının CO emisyonu değerlerinin ortalamasıyla kıyaslandığında; B50+20Mn+PG yakıtında %9.9, B50+40Mn+PG yakıtında %20.1, B50+60Mn+PG yakıtında %30.4 oranında bir azalma tespit edilmiştir.

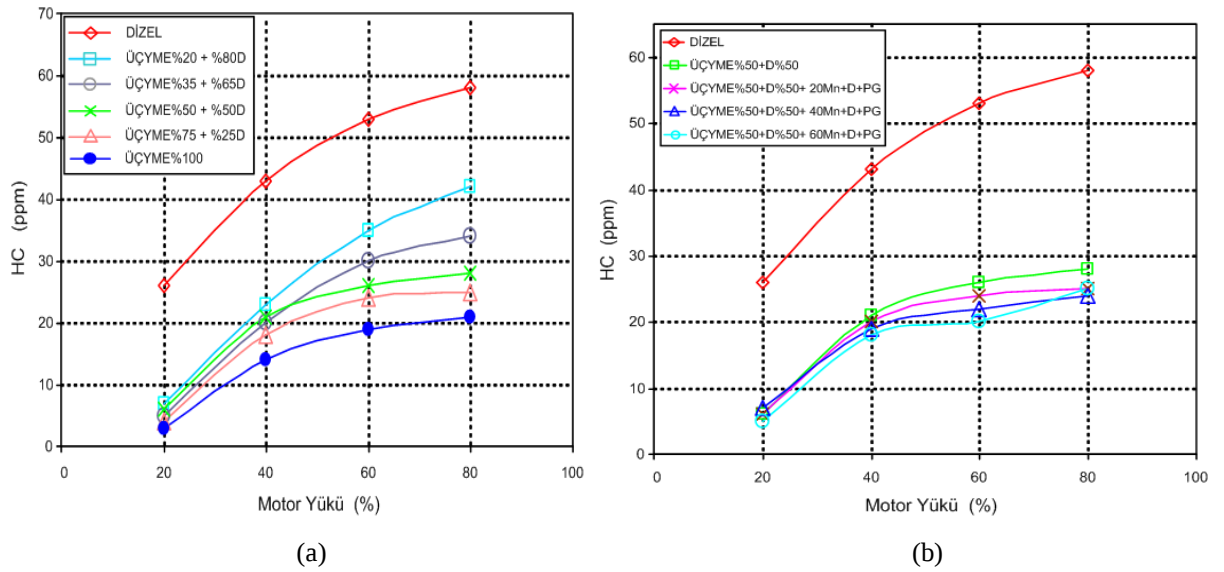
Katkı ilaveli yakıtların CO emisyonu değerleri B50 yakıtına göre daha düşük olduğu Şekil 5.3(b)'de görülmektedir. Katkı maddeleri, ilave edildikleri yakıtın; setan sayısı, parlama noktası, viskozite ve yoğunluk gibi özelliklerini iyileştirmesiyle, B50 yakıtına göre daha iyi bir yanma performansı sağladığı düşünülmektedir [45,70-76]. Şekil 5.3(b)'de görüldüğü gibi, yakıtta Mn ilavesi miktarının artırılmasıyla, CO emisyon değerleri düşmüştür. Mn bazlı katkı maddesinin, yakıtların yanma performansını etkileyecek özelliklerini iyileştirmektedir [70]. Yanma performansının iyileşmesi, CO emisyonunun CO<sub>2</sub>'ye dönüşümü için zaman kazandırdığı düşünülmektedir. Katkı ilaveli numunelerin CO<sub>2</sub> emisyonlarının B50 yakıtına göre yüksek çıkması, belirtilen bu durumu desteklemektedir.

### 5.1.4. ÜÇYME İçerikli Yakıt Numunelerinin Hidrokarbon (HC) Emisyonları Analizi

HC emisyonlarının oluşmasında iki önemli unsur ön plana çıkmaktadır. Birincisi, önceki çevrimden kalan yanmış gazlardır [77]. Motordaki iş sonunda, enjektör ucuna yakın kör noktalarda ve enjektör deliğinde bir miktar da olsa, bir sonraki çevrime yanmış gazlar kalır. Yanma odasında kalan bu gazlar bir sonraki çevrimde sıkıştırılan hava ile karışır. Bu durum yeni hava-yakıt karışımının oksijen oranını düşürerek HC emisyonlarının oluşmasına sebebiyet vermektedir [78].

**Tablo 5.4.** ÜÇYME için hazırlanan yakıt türlerinin değişken yükteki HC değerleri

| Yakıt türü    | HC emisyonu (ppm) |      |      |      |
|---------------|-------------------|------|------|------|
|               | % 20              | % 40 | % 60 | % 80 |
| DY            | 26                | 43   | 53   | 58   |
| B20           | 7                 | 23   | 35   | 42   |
| B35           | 5                 | 20   | 30   | 34   |
| B50           | 6                 | 21   | 26   | 28   |
| B75           | 4                 | 18   | 24   | 25   |
| B100          | 3                 | 14   | 19   | 21   |
| B50+20Mn+D+PG | 6                 | 20   | 24   | 25   |
| B50+40Mn+D+PG | 7                 | 19   | 22   | 24   |
| B50+60Mn+D+PG | 5                 | 18   | 20   | 25   |



**Şekil 5.4.** ÜÇYME için hazırlanan yakıt türlerinin HC emisyonlarının değişimi;

(a) Biyodizel içerikli numuneler, (b) Katkı maddeli numuneler

ÜÇYME'den hazırlanan B20, B35, B50, B75 ve B100 yakıtlarının ölçülen HC emisyonu değerleri, dizel yakıtın değerleriyle karşılaştırılmıştır. Ölçülen HC emisyonu değerleri Tablo 5.4'de sunulmuştur. Biyodizel yakıtları, dizel yakıtının HC emisyonu değerleriyle kıyaslandığında; B20 yakıtında % 40.5, B35 yakıtında % 50.6, B50 yakıtında % 55.3, B75 yakıtında % 60.5 ve B100 yakıtında % 74.9 oranında bir azalma tespit edilmiştir.

Motorda biyodizel yakıtının kullanılmasıyla HC emisyonlarında azalma olduğu Şekil 5.6(a)'dan görülmektedir. Bu azalmanın, biyodizel yakıtlarının yapısındaki oksijenden kaynaklandığı düşünülmektedir. Biyodizel yakıtının oksijen içeriğinin fazla olması yanma reaksiyonuna ek katkı sağlayarak, HC emisyonlarının azalmasına neden olduğu düşünülmektedir. Test edilen yakıt numunelerinin HC emisyon değerlerinde belirgin farklılığın olduğu Şekil 5.4(a)'dan görülmektedir. Her yakıt numunesinin kimyasal içeriğinde değişken oranda oksijen bulunması ve dizel yakıt içerisindeki biyodizel oranının artmasıyla setan sayısı değerinin de aynı paralelde artış göstermesi bu belirgin farklılığın sebebi olarak gösterilebilir. Motordaki yükün artmasıyla beraber tüm yakıtların CO emisyon değerlerinde artış gözlenmiştir. Bu artışın nedeni; yükün artmasına paralel olarak kütleli yakıt sarfiyatının artması şeklinde açıklanabilir.

Literatürde yapılan çalışmalarda; dizel yakıtının, yanma odasında hava ile istenen düzeyde bir karışım oluşturmaması neticesinde yüksek CO ve HC emisyonlarının olduğu belirtilmiştir. Biyodizel karışımlı yakıtların yapısında oksijen bulunması sebebiyle; CO, HC ve duman emisyonlarında azalma tespit edilmiştir. Çünkü yakıtın oksijen içeriği yanma sırasında ek oksijen sağlayarak tam yanmayı geliştirmekte ve bu durumun HC emisyonlarının azalmasına katkı sağladığı belirtilmiştir. Bununla beraber setan sayısı, kaynama noktası, kükürt ve aromatik bileşen içeriği gibi özelliklerin de CO, HC ve duman emisyonlarındaki değişim üzerinde etkili olduğunu ifade edilmiştir [70,71,77,78].

B50 yakıtının HC emisyonu değerleri, B50+20Mn+PG, B50+40Mn+PG ve B50+60Mn+PG yakıtlarının HC değerleriyle karşılaştırılmıştır. Ölçülen HC emisyonu değerleri Tablo 5.4'de sunulmuştur. Katkı ilaveli yakıtlar, B50 yakıtının HC değerleri ile kıyaslandığında; B50+20Mn+PG yakıtında %6.25, B50+40Mn+PG yakıtında %10, B50+60Mn+PG yakıtında %15 oranında bir azalma tespit edilmiştir.

Test yakıtlarına katkı maddelerinin ilave edilmesiyle HC emisyon değerleri B50 yakıtına kıyasla azalma olduğu Şekil 5.4(b)'de görülmüştür. Katkı maddeleri yakıtın setan sayısını ve oksijen içeriğini arttırdığı ve neticesinde de iyi bir yanma karakteristiğinin oluşmasına katkı sağladığı düşünülmektedir. Propilen glikolun ve dodekanolun oksijen bakımından zengin bir

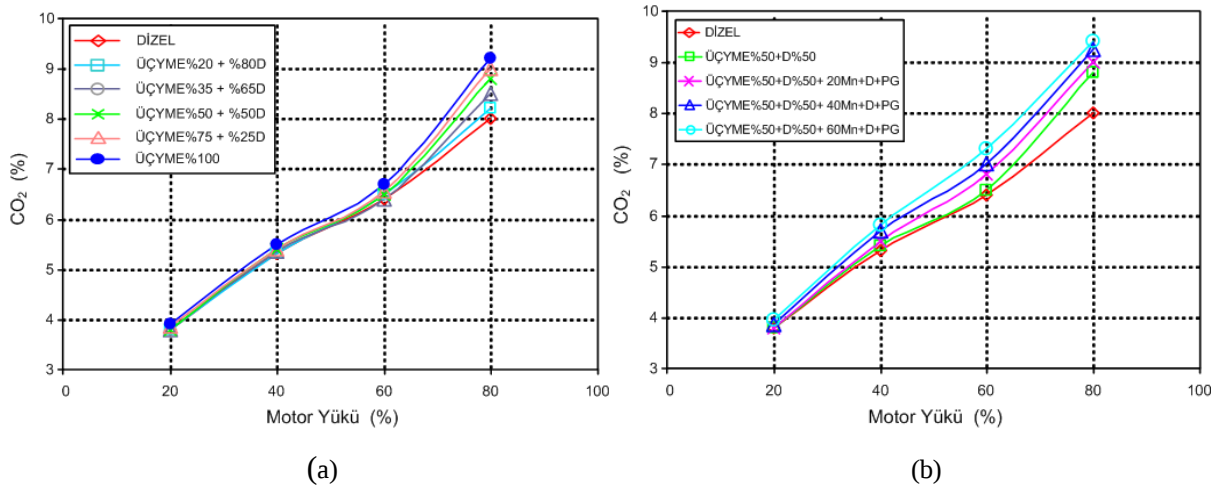
yapıya sahip olması, Mn bazlı katkı maddesinin ise setan sayısı üzerinde olumlu bir katkı sağladığı düşünülmektedir.

### 5.1.5. ÜÇYME İçerikli Yakıt Numunelerinin Karbondioksit (CO<sub>2</sub>) Emisyonları Analizi

CO<sub>2</sub> emisyonları doğrudan yanma ile ilgilidir. Dizel bir motor düşük devirde çalışıyorsa, yanma performansı da düşüktür. Çünkü düşük devirlerde silindir içi sıcaklık değeri optimum şartlarda olmadığı için kötü bir yanma reaksiyonu gerçekleşmektedir [78].

**Tablo 5.5.** ÜÇYME için hazırlanan yakıt türlerinin değişken yükteki CO<sub>2</sub> değerleri

| Yakıt türü    | CO <sub>2</sub> emisyonu (%) |      |      |      |
|---------------|------------------------------|------|------|------|
|               | % 20                         | % 40 | % 60 | % 80 |
| DY            | 3,8                          | 5,3  | 6,4  | 8    |
| B20           | 3,8                          | 5,3  | 6,5  | 8,2  |
| B35           | 3,8                          | 5,35 | 6,4  | 8,5  |
| B50           | 3,8                          | 5,4  | 6,5  | 8,8  |
| B75           | 3,85                         | 5,4  | 6,55 | 9    |
| B100          | 3,9                          | 5,5  | 6,7  | 9,2  |
| B50+20Mn+D+PG | 3,8                          | 5,5  | 6,8  | 9    |
| B50+40Mn+D+PG | 3,85                         | 5,7  | 7    | 9,25 |
| B50+60Mn+D+PG | 3,95                         | 5,8  | 7,3  | 9,4  |



**Şekil 5.5.** ÜÇYME için hazırlanan yakıt türlerinin CO<sub>2</sub> emisyonlarının değişimi;

(a) Biyodizel içerikli numuneler, (b) Katkı maddeli numuneler

ÜÇYME'den hazırlanan B20, B35, B50, B75 ve B100 yakıtlarının ölçülen CO<sub>2</sub> emisyonu değerleri, dizel yakıtın değerleriyle karşılaştırılmıştır. Ölçülen CO<sub>2</sub> emisyonu değerleri Tablo 5.5'de sunulmuştur. Biyodizel yakıtlarının CO<sub>2</sub> emisyonu değerleri, dizel yakıtının değerleriyle kıyaslandığında; B20 yakıtında % 1.4, B35 yakıtında % 2.35, B50 yakıtında %2.4, B75 yakıtında % 2.52 ve B100 yakıtında % 2.7 oranında bir artış tespit edilmiştir.

Şekil 5.5(a)'dan, test yakıtlarının hepsinde motordaki yükün artmasıyla beraber CO<sub>2</sub> emisyon değerlerinde artış olduğu görülmektedir. Motordaki yükün artmasına paralel bir artış gösteren ÖYT ve egzoz çıkış sıcaklığı değerlerinin, CO<sub>2</sub> emisyonlarındaki artışa sebebiyet verdiği düşünülmektedir. Tablo 5.5'deki veriler incelendiğinde, dizel yakıtının içerisindeki biyodizel oranının artmasıyla CO<sub>2</sub> emisyon değerleri artmıştır. Dizel yakıtına kıyasla biyodizelin yapısında daha fazla bulunan oksijenin, silindir içindeki yanma esnasında karbon atomu ile reaksiyona girerek CO<sub>2</sub> emisyonlarını oluşturduğu düşünülmektedir. Ayrıca Şekil 5.6(a)'da görüldüğü gibi yükün artmasıyla O<sub>2</sub> emisyonu değerlerinin düşmesi de bu durumu desteklemektedir.

B50 yakıtının CO<sub>2</sub> değerleri de, B50+20Mn+PG, B50+40Mn+PG ve B50+60Mn+PG yakıtlarının CO<sub>2</sub> değerleriyle karşılaştırılmıştır. Ölçülen CO<sub>2</sub> emisyonu değerleri Tablo 5.5'de sunulmuştur. Katkı ilaveli yakıtlar, B50 yakıtının CO<sub>2</sub> değerleriyle kıyaslandığında; B50+20Mn+PG yakıtında %2.5, B50+40Mn+PG yakıtında %5.3, B50+60Mn+PG yakıtında %8 oranında bir artış tespit edilmiştir.

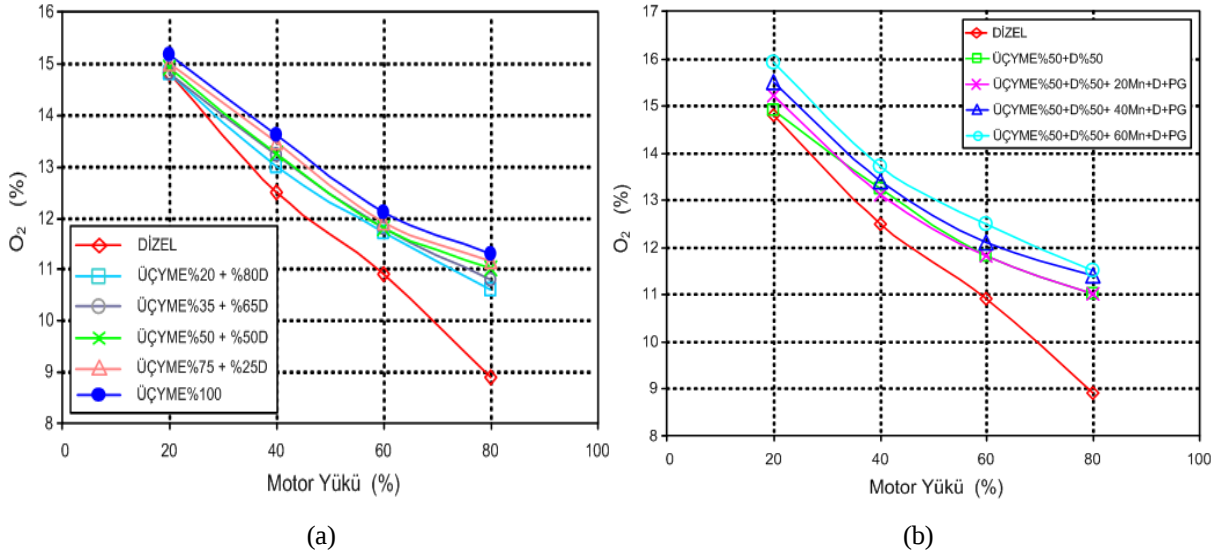
Şekil 5.5(b)'den görüldüğü gibi, katkı maddeleri, ilave edildikleri yakıtlarında CO<sub>2</sub> emisyon değerlerinin artışına sebep olmuştur. Katkı maddeleri, ilave edildikleri yakıtların oksijen içeriğini arttırmaktadır. Yanma reaksiyonu esnasında ortamda oksijen miktarının fazla olması, daha fazla karbon atomu oksitlenmesine ve bunun neticesinde de CO<sub>2</sub> emisyonlarının artmasına neden olduğu düşünülmektedir. Ayrıca katkı maddeleri, numunelerin setan sayısı, viskozite, yoğunluk ve parlama noktası gibi özellikleri iyileştirerek yanma verimine katkı sağlamaktadır [45,70-76]. İyi bir yanma reaksiyonunun oluşması, silindir içi sıcaklığı arttırırken beraberinde de CO<sub>2</sub> emisyon değerlerinin yükselmesine sebep olduğu düşünülmektedir.

### 5.1.6. ÜÇYME Yakıt Numunelerinin Oksijen (O<sub>2</sub>) Emisyonları Analizi

İçten yanmalı motorlarda enerji, hava-yakıt karışımının yanması sonucu elde edilmektedir. Hava ve yakıtın içerisinde bulunan oksijen motorda yanma reaksiyonu sonucunda oluşan bir emisyon ürünüdür.

**Tablo 5.6.** ÜÇYME yakıt türlerinin değişken yükteki O<sub>2</sub> değerleri

| Yakıt türü    | O <sub>2</sub> emisyonu (ppm) |       |      |       |
|---------------|-------------------------------|-------|------|-------|
|               | % 20                          | % 40  | % 60 | % 80  |
| DY            | 14,8                          | 12,5  | 10,9 | 8,9   |
| B20           | 14,8                          | 13    | 11,7 | 10,6  |
| B35           | 14,8                          | 13,2  | 11,8 | 10,8  |
| B50           | 14,9                          | 13,25 | 11,8 | 11    |
| B75           | 15                            | 13,45 | 11,9 | 11,15 |
| B100          | 15,15                         | 13,6  | 12,1 | 11,3  |
| B50+20Mn+D+PG | 15,2                          | 13,1  | 11,8 | 11    |
| B50+40Mn+D+PG | 15,5                          | 13,4  | 12,1 | 11,4  |
| B50+60Mn+D+PG | 15,9                          | 13,7  | 12,5 | 11,5  |



**Şekil 5.6.** ÜÇYME için hazırlanan yakıt türlerinin O<sub>2</sub> emisyonlarının değişimi;

(a) Biyodizel içerikli numuneler, (b) Katkı maddeli numuneler

ÜÇYME'den hazırlanan B20, B35, B50, B75 ve B100 yakıtlarının, ölçülen O<sub>2</sub> emisyonu değerleri, dizel yakıtın değerleriyle ile karşılaştırılmıştır. Ölçülen O<sub>2</sub> emisyonu değerleri Tablo 5.6'da sunulmuştur. Biyodizel yakıtları, dizel yakıtının O<sub>2</sub> değerleriyle kıyaslandığında;

B20 yakıtında % 6.5, B35 yakıtında % 7.5, B50 yakıtında % 8.3, B75 yakıtında % 9.2 ve B100 yakıtında % 10.8 oranında bir artış tespit edilmiştir.

Tüm test yakıtları için motordaki yük artıka O<sub>2</sub> emisyonlarında azalma olduğu Şekil 5.6(a)'dan görölmektedir. Test yakıtlarının %20 yükte yüksek olan O<sub>2</sub> emisyonu değeri yüklemenin artmasıyla ters orantılı olarak azalmıştır. %20 yükte silindir içi sıcaklığın düşük olması nedeniyle, oksijenin karbon atomu ile reaksiyon oluşturmadağı düşünölmektedir. %20 yükte karbon oksijen oksitlenmesi gerçekteşmemesi neticesinde, egzoz gazlarındaki O<sub>2</sub> miktarının arttığı, CO<sub>2</sub> miktarının da azaldığı Şekil 5.5(a) ve Şekil 5.6(a)'dan görölmektedir. Dizel yakıt içerisindeki biyodizel oranının artmasıyla, O<sub>2</sub> emisyonları da aynı paralelde arttığı Şekil 5.6(a)'dan görölmektedir. Biyodizelin dizel yakıtına göre daha fazla oksijen içermesi, biyodizel yakıtlarında O<sub>2</sub> emisyonlarının yüksek çıkmasına sebep olduğu düşünölmektedir. Biyodizel kullanıldığında elde edilen CO emisyonlarının daha düşük olması bu düşünceyi ayrıca desteklemektedir.

B50 yakıtının O<sub>2</sub> değeri B50+20Mn+PG, B50+40Mn+PG ve B50+60Mn+PG yakıtlarının O<sub>2</sub> değeriyle karşılaştırılmıştır. Ölçölen O<sub>2</sub> emisyonu değeri Tablo 5.6'da sunulmuştur. Katkı ilaveli yakıtlar, B50 yakıtının O<sub>2</sub> değeriyle kıyaslandığında; B50+20Mn+PG yakıtında %0.4, B50+40Mn+PG yakıtında %2.9, B50+60Mn+PG yakıtında %5.3 oranında bir artış tespit edilmiştir.

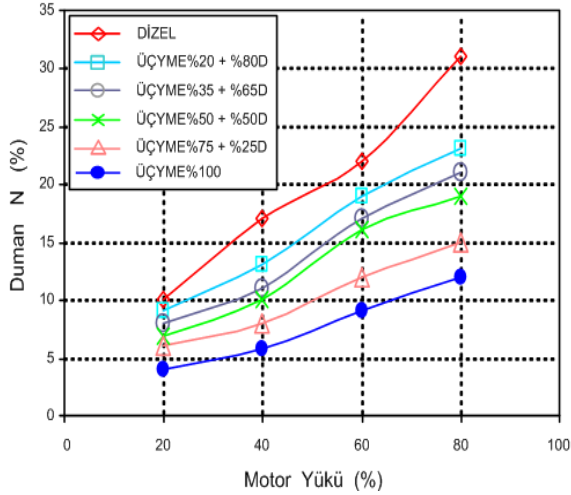
Şekil 5.6(b)'de göröldüğü gibi katkılı yakıt numunelerinde düşük yük şartlarında yüksek olan oksijen miktarı, yüklemenin artmasıyla orantılı olarak düşmüştür. Yükün artmasıyla beraber O<sub>2</sub> emisyon değeri tñm test yakıtları için düşmesinin nedenini, %20 ile %80 yük değeri arasında O<sub>2</sub> ile CO<sub>2</sub> emisyon değeri tñm ters orantılı olması şeklinde açıklanabilir. Şekil 5.5(b)'de ve Şekil 5.6(b)'de göröldüğü gibi, O<sub>2</sub> değeri tñm yüksek olduğu durumda CO<sub>2</sub> değeri düşük, O<sub>2</sub> değeri tñm düşük olduğu durumda CO<sub>2</sub> değeri yüksek olduğu görölmektedir. Şekil 5.6(b)'den göröldüğü gibi, katkı maddelerinin ilavesi ile O<sub>2</sub> emisyonu değeri tñm artış olmuştur. Bu artışın, gerek biyodizel yakıtındaki gerekse katkı maddelerindeki oksijen içeriğinin fazla olmasından kaynaklandığı düşünölmektedir. Katkı maddelerinin %20 yük durumundan itibaren, O<sub>2</sub> emisyon değeri tñm farklılığa sebebiyet verdiğı Şekil 5.6(b)'den görölmektedir. Her ne kadar karbon atomu oksitlemesi sonucu CO<sub>2</sub>'ye dönüşüm olsa da katkı ilaveli yakıtlardaki oksijen miktarının fazla olması bazı oksijen gazlarının karbon atomu ile bağ kuramamasına sebep olduğu düşünölmektedir. Katkılı numunelerin içeriğindeki oksijen miktarının, B50 yakıtı ile katkı ilaveli yakıtların O<sub>2</sub> emisyon değeri tñm arasındaki farklılığı oluşturduğu düşünölmektedir.

### 5.1.7. ÜÇYME İçerikli Yakıt Numunelerinin Duman (İs) Emisyonları Analizi

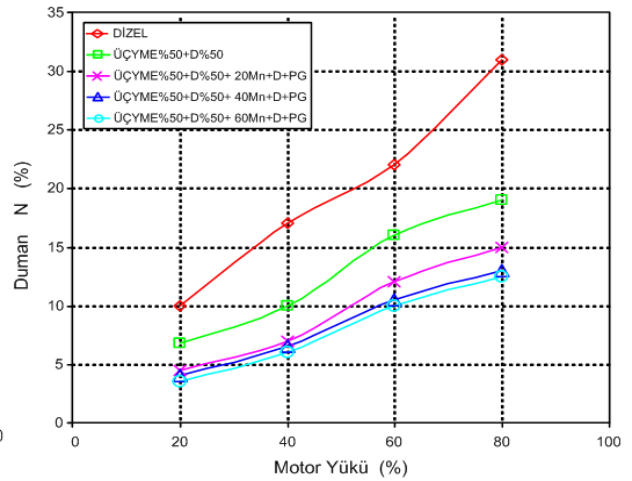
Alev içerisindeki türbülanslı karışım alanları ve Sıcaklık is oluşumunu etkileyen önemli parametrelerdir. Bölgesel sıcaklık değişimi ve oksijen konsantrasyonu dağılımı is oluşum mekanizmasının temel fiziksel büyüklükleridir. Bununla beraber yakıtın yüksek oksijen içeriği, düşük C/H oranı ve aromatik bileşenlerin olmaması duman oluşumunda önemli bir etkiye sahiptir [76].

**Tablo 5.7.** ÜÇYME için hazırlanan yakıt türlerinin değişken yükteki duman emisyon değerleri

| Yakıt türü    | Duman emisyonu (%) |      |      |      |
|---------------|--------------------|------|------|------|
|               | % 20               | % 40 | % 60 | % 80 |
| DY            | 10                 | 17   | 22   | 31   |
| B20           | 9                  | 13   | 19   | 23   |
| B35           | 8                  | 11   | 17   | 21   |
| B50           | 6,8                | 10   | 16   | 19   |
| B75           | 6                  | 8    | 12   | 15   |
| B100          | 4                  | 5,8  | 9    | 12   |
| B50+20Mn+D+PG | 4,5                | 7    | 12   | 15   |
| B50+40Mn+D+PG | 4                  | 6,5  | 10,5 | 13   |
| B50+60Mn+D+PG | 3,5                | 6    | 10   | 12,5 |



(a)



(b)

**Şekil 5.7.** ÜÇYME için hazırlanan yakıt türlerinin duman emisyonlarının değişimi;

(a) Biyodizel içerikli numuneler, (b) Katkı maddeli numuneler

ÜÇYME'den hazırlanan B20, B35, B50, B75 ve B100 yakıtlarının ölçülen duman emisyon değerleri, dizel yakıtın değerleriyle karşılaştırılmıştır. Ölçülen duman emisyonu

değerleri Tablo 5.7’de sunulmuştur. Biyodizel yakıtları, dizel yakıtının duman emisyon değerleriyle kıyaslandığında; B20 yakıtında % 25, B35 yakıtında % 29, B50 yakıtında % 35.2, B75 yakıtında % 49 ve B100 yakıtında % 61 oranında bir azalma tespit edilmiştir.

Biyodizel kullanıldığında duman emisyonu değerlerinin dizel yakıtına göre düşük çıkmasının temel nedeni, biyodizelin oksijen bakımından zengin bir yapıya sahip olması olarak açıklanabilir. Ayrıca dizel yakıtına kıyasla daha düşük karbon atomu içeren biyodizel, yapısındaki oksijenden dolayı yanma sırasında oksitlenme miktarını arttırarak, duman emisyonlarının oluşumunu azalttığı düşünülmektedir. Nitekim; dizel yakıt içerisindeki biyodizel oranının artmasıyla duman emisyonlarının azaldığı Şekil 5.7(a)’da görülmektedir.

Biyodizelin oksijen içeriğinden dolayı, duman emisyonlarında önemli bir düşüş sağlandığı belirtilmiştir [77]. Ayrıca karbon içeriğinin düşük olmasından dolayı duman emisyonlarının azaldığı da belirtilmiştir. Oksijen içerikli yakıtlar silindir içi sıcaklığı arttırmaktadır. Bu artışın yanma verimini olumlu etkileyerek bölgesel sıcaklık değişimini önlediği düşünülmektedir. Bölgesel sıcaklık değişimi ve oksijen konsantrasyonu dağılımı is oluşumunu tetikleyen temel mekanizmalardır [76].

B50 yakıtının duman emisyon değerleri de, B50+20Mn+PG, B50+40Mn+PG ve B50+60Mn+PG yakıtlarının duman emisyon değerleriyle karşılaştırılmıştır. Ölçülen duman emisyonu değerleri Tablo 5.7’de sunulmuştur. Katkı ilaveli yakıtlar, B50 yakıtının duman emisyon değerleriyle kıyaslandığında; B50+20Mn+PG yakıtında %25.8, B50+40Mn +PG yakıtında %33.7, B50+60Mn+PG yakıtında %38.1 oranında bir azalma tespit edilmiştir.

Şekil 5.7(b)’den görüldüğü gibi, katkı maddelerinin ilavesi ile duman emisyonu değerlerinde azalma olmuştur. Kullanılan katkı maddelerinin oksijen oranı biyodizel yakıtlarına kıyasla daha fazladır. B50 yakıtının Mn, propilen glikol ve dodekanol gibi katkı maddeleriyle desteklenmesi karbon oranını düşürüp oksijen oranı arttırmaktadır. Oksijen miktarının artması, yanma sırasında oksitlenme reaksiyonu hızlandırarak duman oluşumu azalttığı düşünülmektedir. Ayrıca yakıtı ilave edilen katkı maddeleri yanma reaksiyonuna istikrarlı bir yapı kazandırıp, alev içerisinde türbülanslı karışım alanları ve duman emisyonları oluşumlarını engellediği düşünülmektedir.

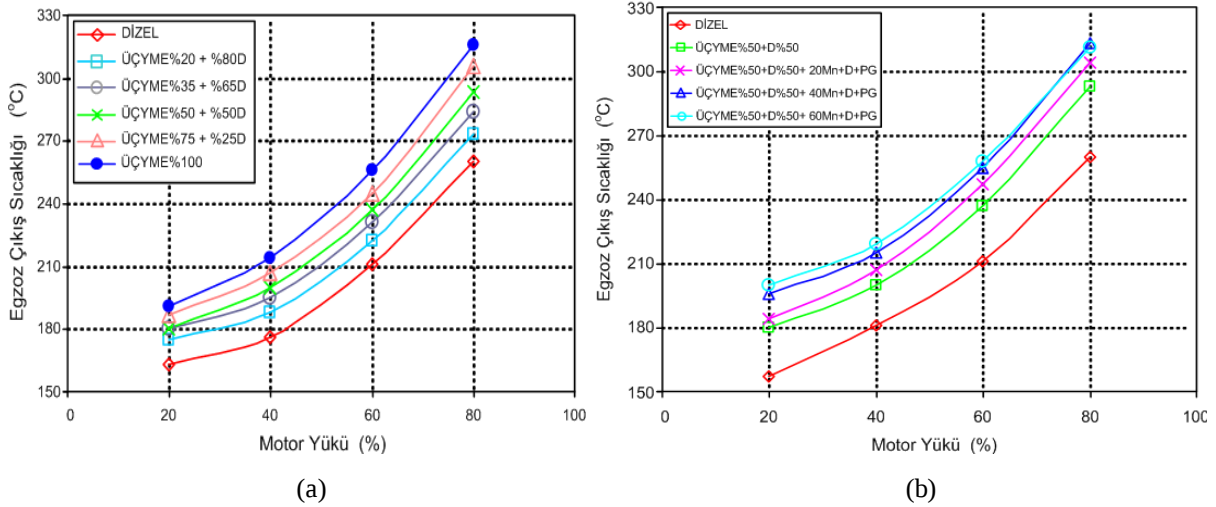
#### **5.1.8. ÜÇYME İçerikli Yakıt Numunelerinin Egzoz Gazları Sıcaklık Analizi**

İçten yanmalı motorlarda silindir içerisinde yakıtın yanması sonucu elde edilen ısı enerjisinin bir kısmı soğutma, egzoz ve sürtünme yolu ile kaybedilmektedir. Kaybedilen bu

enerji kayıplar neticesinde geriye kalan ısı enerjisi mekanik enerjiye dönüştürülerek motordaki güç elde edilmektedir.

**Tablo 5.8.** ÜÇYME için hazırlanan yakıt türlerinin değişken yükteki egzoz çıkış sıcaklığı değerleri

| Yakıt türü    | Egzoz çıkış sıcaklığı (°C) |      |      |      |
|---------------|----------------------------|------|------|------|
|               | % 20                       | % 40 | % 60 | % 80 |
| DY            | 163                        | 176  | 211  | 260  |
| B20           | 175                        | 188  | 222  | 273  |
| B35           | 180                        | 195  | 231  | 284  |
| B50           | 180                        | 200  | 237  | 293  |
| B75           | 187                        | 207  | 245  | 306  |
| B100          | 191                        | 214  | 256  | 316  |
| B50+20Mn+D+PG | 184                        | 207  | 247  | 304  |
| B50+40Mn+D+PG | 196                        | 215  | 255  | 313  |
| B50+60Mn+D+PG | 200                        | 219  | 258  | 311  |



**Şekil 5.8.** ÜÇYME için hazırlanan yakıt türlerinin egzoz çıkış sıcaklığı değişimi;

(a) Biyodizel içerikli numuneler, (b) Katkı maddeli numuneler

ÜÇYME'den hazırlanan B20, B35, B50, B75 ve B100 yakıtlarının ölçülen egzoz çıkış sıcaklığı değerleri, dizel yakıtın değerleriyle karşılaştırılmıştır. Ölçülen egzoz çıkış sıcaklığı değerleri Tablo 5.8'de sunulmuştur. Biyodizel yakıtları, dizel yakıtının egzoz çıkış sıcaklığı değerleriyle kıyaslandığında; B20 yakıtında %6, B35 yakıtında %9.9, B50 yakıtında %12.35, B75 yakıtında %16.7 ve B100 yakıtında %20.6 oranında bir artış tespit edilmiştir.

Şekil 5.8(a)'dan görüldüğü gibi, motordaki yükün artmasıyla beraber test yakıtlarının egzoz çıkış sıcaklıkları artmıştır. Motorda üretilmesi gereken gücü arttırabilmek için daha fazla ısı enerjisine ihtiyaç duyulmaktadır. Yanma odasındaki ısı enerjisinin yüksek olması, egzoz çıkış sıcaklığının yüksek olmasına sebep olduğu düşünülmektedir. Motorda biyodizel yakıtının kullanılmasıyla egzoz çıkış sıcaklığının arttığı Şekil 5.8(a)'dan görülmektedir. Dizel yakıtı ile biyodizel yakıtının egzoz çıkış sıcaklığı değerlerindeki farklılığa, biyodizel yakıtının oksijen içeriği ve setan sayısının yüksek olması gibi özelliklerden kaynaklandığı düşünülmektedir. Test yakıtlarının, içeriğindeki oksijen nispetinde iyi bir yanma performansı sergileyerek, farklı değerlerde egzoz çıkış sıcaklığı oluşturduğu düşünülmektedir. Ayrıca biyodizelin sahip olduğu yüksek viskozite ve setan sayısından dolayı daha yavaş ve uzun bir yanmanın gerçekleşiyor olması biyodizel kullanımında daha yüksek egzoz sıcaklığın oluşmasına sebep olarak gösterilebilir. Dizel motorlarda yakıt olarak biyodizel kullanıldığında yanmanın daha uzun devam etmesinden dolayı egzoz sıcaklığının daha yüksek çıktığını belirtmiştir [78]. Egzoz gazı sıcaklığının tutuşma gecikmesinden etkilendiğini ve biyodizelin setan sayısının yüksek olmasından dolayı daha düşük tutuşma gecikmesi periyodu sergilediğini ve bunun da biyodizel kullanıldığında egzoz gazı sıcaklığını artırdığını belirtmiştir [13].

B50 yakıtının egzoz çıkış sıcaklığı değerleri de, B50+20Mn+PG, B50+40Mn+PG ve B50+60Mn+PG yakıtlarının egzoz çıkış sıcaklığı değerleriyle karşılaştırılmıştır. Ölçülen egzoz çıkış sıcaklığı değerleri Tablo 5.8'de sunulmuştur. Katkı ilaveli yakıtlar, B50 yakıtının egzoz çıkış sıcaklığı değerleriyle kıyaslandığında; B50+20Mn+PG yakıtında %3.5, B50+40Mn+PG yakıtında %7.6, B50+60Mn+PG yakıtında %8.8 oranında bir artış tespit edilmiştir.

Şekil 5.8(b)'den görüldüğü gibi, B50 yakıtına ilave edilen Mn, dodekanol ve propilen glikol gibi katkı maddeleri egzoz çıkış sıcaklık değerlerini arttırmıştır. Katkı maddeleri yakıtın setan sayısını ve oksijen içeriğini arttırdığı ve neticesinde de iyi bir yanma karakteristiğinin oluşmasına katkı sağladığı düşünülmektedir. Yüksek setan sayısı daha düşük tutuşma gecikmesi periyodu oluşturduğundan egzoz gazı sıcaklığı artmaktadır. Yakıtın kimyasal bağ yapısındaki oksijen miktarının artması, yakıtlara olumlu bir yanma performansı kazandırarak, egzoz çıkış sıcaklığını arttırmaktadır[13,78].

## 5.2. KÇYME İçin Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Kayısı çekirdeğinden elde edilen biyodizeller (KÇYME), belli oranlarda dizel yakıt ile karıştırılarak beş farklı yakıt numunesi elde edilmiştir. Ayrıca B50 yakıtına değişik özellikteki katkı maddeleri ilave edilerek, numunelerin ÖYT ve egzoz emisyon değerleri test edilmiştir. Test işleminin sonunda elde edilen değerler karşılaştırmalı bir şekilde aşağıda sunulmuştur.

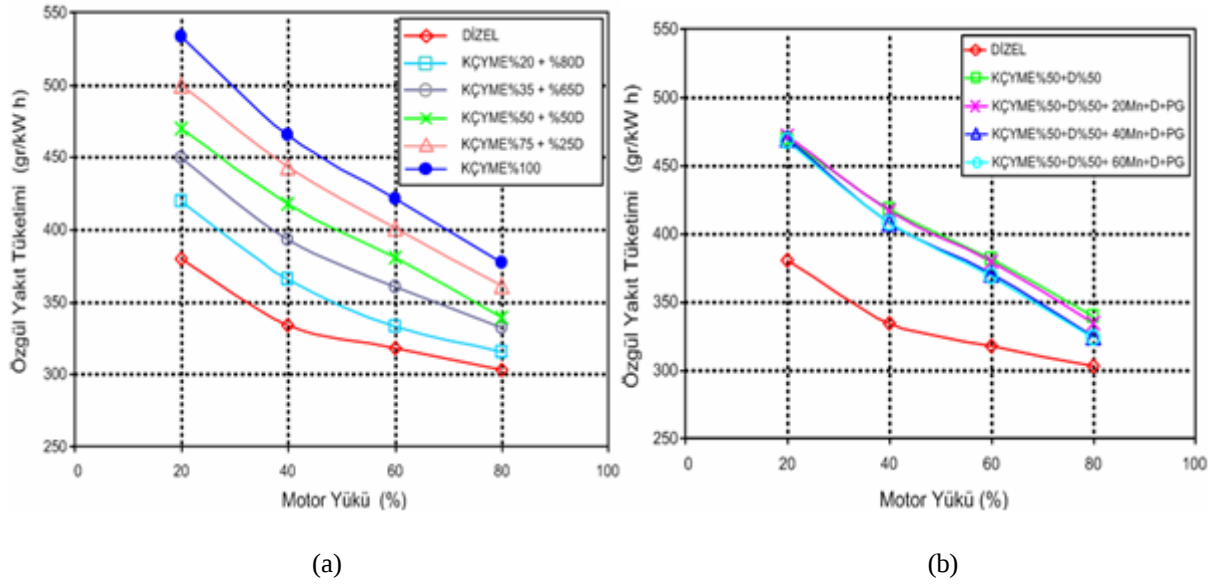
### 5.2.1. KÇYME İçerikli Yakıt Numunelerinin Özgül Yakıt Tüketimi Analizi

Özgül yakıt tüketimi, birim güç başına tüketilen kütsel yakıt miktarı olarak tanımlanmaktadır.

Bu çalışmada, sabit yükte, devir değişimine bağıl özgül yakıt tüketimi (ÖYT) ölçümü yerine, sabit hızda, yük değişimine bağıl ÖYT ölçümü gerçekleştirilmiştir. Test motoru, 1500 dev/dak.'lık sabit hızda, %20, %40, %60 ve %80 değişken yük şartlarında çalıştırılarak ÖYT değerleri ölçülmüştür. Motor devri, motor test düzeneğinde bulunan elektronik hız kontrol ünitesiyle sabit tutulmuştur. Elektronik hız kontrol ünitesi, motor devrini sabit tutmak için, yükün artışına bağıl olarak tüketilecek yakıtın miktarını otomatik olarak arttırmaktadır.

**Tablo 5.9.** KÇYME yakıt türlerinin değişken yükteki ÖYT değerleri

| Yakıt türü    | ÖYT değeri (gr/kWh) |      |      |      |
|---------------|---------------------|------|------|------|
|               | % 20                | % 40 | % 60 | % 80 |
| DY            | 380                 | 334  | 318  | 303  |
| B20           | 419                 | 366  | 333  | 315  |
| B35           | 449                 | 393  | 360  | 332  |
| B50           | 470                 | 418  | 381  | 339  |
| B75           | 500                 | 443  | 401  | 361  |
| B100          | 533                 | 465  | 421  | 377  |
| B50+20Mn+D+PG | 472                 | 417  | 379  | 334  |
| B50+40Mn+D+PG | 470                 | 408  | 371  | 325  |
| B50+60Mn+D+PG | 468                 | 408  | 369  | 324  |



**Şekil 5.9.** KÇYME için hazırlanan yakıt türlerinin ÖYT emisyonlarının değişimi;

(a) Biyodizel içerikli numuneler, (b) Katkı maddeli numuneler

1500 dev/dak.'lık sabit hızda, %20, %40, %60 ve %80 değişken yük şartlarında çalıştırılarak ÖYT ölçülmüştür. KÇYME'den hazırlanan B20, B35, B50, B75 ve B100 yakıtlarının motor performans testlerinden ölçülen ÖYT değerleri dizel yakıtın değerleriyle karşılaştırılmıştır. Ölçülen ÖYT değerleri Tablo 5.9'da sunulmuştur. Biyodizel yakıtları, dizel yakıtının ÖYT değerleriyle kıyaslandığında; B20 yakıtında % 7.6, B35 yakıtında % 15.2, B50 yakıtında % 20.8, B75 yakıtında % 28 ve B100 yakıtında % 35 oranında bir artış tespit edilmiştir.

Şekil 5.9(a)'da görüldüğü gibi Tüm yakıt türleri arasında en düşük özgül yakıt tüketiminin dizel yakıtı kullanıldığında, en yüksek özgül yakıt tüketiminin de B100 kullanıldığında elde edilmiştir. Test yakıtlarının ÖYT değerleri, dizel yakıtı içerisindeki biyodizel miktarının artmasıyla orantılı bir şekilde artmaktadır. Biyodizel yakıtının; ısı değeri düşük, viskozite ve yoğunluk değerlerinin yüksek olması, ÖYT değerlerinin yüksek değerde çıkmasına sebep olduğu düşünülmektedir. Şekil 5.9(a)'da görüldüğü gibi, aynı yük şartlarında test edilen dizel ve biyodizel yakıtları aynı gücü üretmelerine rağmen biyodizel yakıtının ÖYT değeri dizel yakıtına kıyasla daha yüksektir. Belirtilen bu durum üç nedene bağlanmıştır. Birinci neden, formüsel olarak da hesaplanabileceği üzere, birbirleri arasındaki yoğunluk farkıdır. Çünkü enjeksiyon pompası yakıtları hacimsel olarak ölçerek silindirlere göndermektedir. Biyodizelin yoğunluğunun dizel yakıtına göre yüksek olmasından dolayı kütleli yakıt tüketimi, biyodizel yakıtlarında yüksek değerde çıkmaktadır. Diğer bir deyişle, yoğunluğu yüksek olan yakıt numunesinin silindirlere gönderilen gram cinsinden değeri

fazladır. Yoğunluğu yüksek değerde olan yakıt numunelerinde ÖYT değerlerinin yüksek çıkması kaçınılmaz bir sonuçtur. İkinci neden ise; test yakıtları arasındaki viskozite farklılığıdır. Yüksek viskoziteye sahip yakıtlar aynı enjektör basıncıyla ve aynı enjektör memesinin delik çapından püskürtüldüğünde daha iri taneli olarak yanma odasına giriş yapmaktadır. Bu durumda yakıt molekülleri, sıkıştırılmış hava ile iyi bir karışım gerçekleştiremeyecektir. Sonuç olarak, yakıtın buharlaşma ve yanma verimi olumsuz etkilenecektir. Bu durum harcanan yakıt miktarını arttıracığından, ÖYT değerlerini de o oranda yükselecektir [24,59]. ÖYT'yi etkileyen faktörlerden bir diğeri ise yakıtın ısıl değeridir. Her yakıt numunesi için aynı yük şartlarında test yapıldığında, yanma reaksiyonunun sonunda aynı ısıl enerji elde edilmesi gerekir. Eşit ısı enerjisi sağlayabilmek için, dizel yakıtına kıyasla biyodizel yakıtından kütleli olarak daha fazla yanma odasına alınması gerekir. Ancak bu şartlarda yakıtlar arası enerji eşdeğerliği sağlanmış olabilir. Bu durum ise, biyodizel yakıtlarında daha fazla yakıt tüketimine sebep olmaktadır. Sonuç olarak, püskürtülen yakıtın; yoğunluğu, viskozitesi ve ısıl değeri ÖYT doğrudan etkileyen unsurlardır [12,56,60,61].

B50 yakıtının ÖYT değerleri de, katkı ilaveli yakıtlarının ÖYT değerleriyle karşılaştırılmıştır. Test yakıtlarının ÖYT değerleri Tablo 5.9'da sunulmuştur. Katkı ilaveli yakıtlar, B50 yakıtının ÖYT değerleriyle kıyaslandığında; B50+20Mn $\mu$ mol/lit+PG yakıtında %0.4, B50+40Mn $\mu$ mol/lit+PG yakıtında %2, B50+60Mn $\mu$ mol/lit+PG yakıtında %2.3 oranında bir azalma tespit edilmiştir.

Katkı maddelerin, ilave edildikleri yakıtların ÖYT değerlerinin azalmasına katkı sağladığı Şekil 5.9(b)'den görülmektedir. Katkı maddelerinin yakıt numunelerinde; setan sayısı, viskozite, yoğunluk ve parlama noktası gibi özellikleri iyileştirmesinin ve ayrıca yanma reaksiyonunda katalizör olarak görev yapmasının, neticesinde ÖYT değerlerinin azaldığı düşünülmektedir. Ayrıca, B50 yakıtına ilave edilen Mn bazlı katkı maddesi miktarlarının artışına bağlı olarak ÖYT değerinin daha da azaldığı Şekil 5.9(b)'den görülmektedir. Metal bazlı katkı maddesinin yakıtı ilave edilmesinin; setan sayısı, viskozite ve parlama noktası gibi özelliklere olumlu yönde katkı sağladığı belirtilmiştir [24-27]. Fakat metal bazlı katkı maddelerinin yakıtı ilave edilme oranının bir optimum değerinin olduğu, bu değer üzerine çıkıldığında ise, setan sayısı, yoğunluk, viskozite ve parlama noktası gibi özelliklerinin olumsuz bir şekilde etkilendiği de ayrıca belirtilmiştir [27]. KÇYME'den hazırlanan B50 yakıtına, 20,40 ve 60  $\mu$ mol/lit ölçeğinde Mn dozlaması yapılmıştır. Belirtilen bu ölçekler arasında, en iyi performansın 40  $\mu$ mol/lit ölçeğindeki Mn kullanımında gerçekleştiği Şekil 5.9(b)'den görülmektedir. Her ne kadar biyodizel yakıtlarının karbon, hidrojen ve oksijen

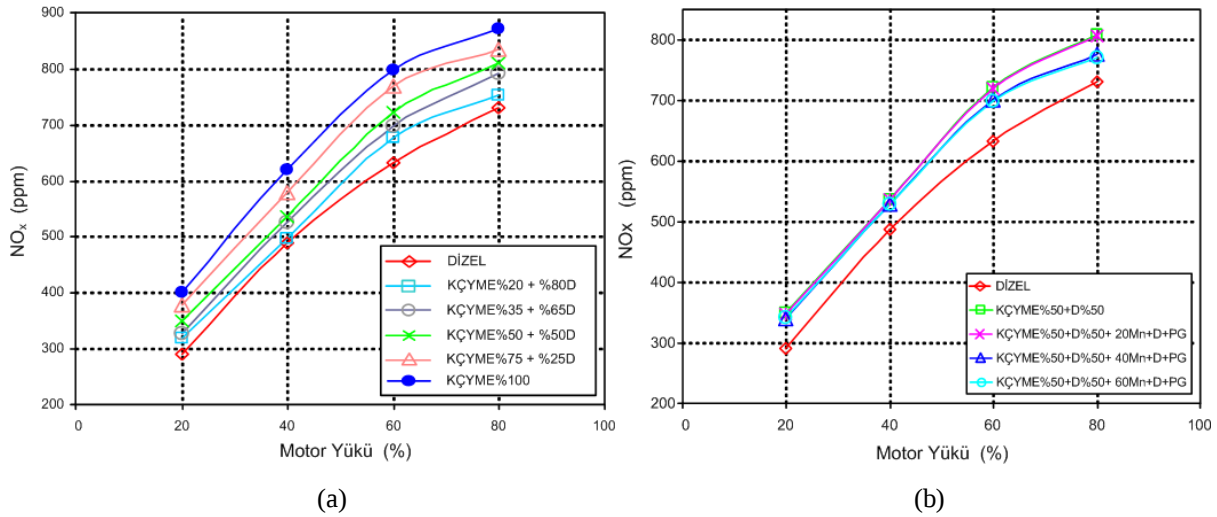
oranları birbirlerine benzer değerlerde olsa da, Tablo 3.1'deki yağ asit kompozisyonu değerlerinden görüldüğü gibi kimyasal bağ yapıları birbirlerinden farklıdır. Bu sebeple, Mn bazlı katkı maddesinin en uygun dozlama miktarının değişken değerlerde olması beklenen bir durumdur. Yapılan motor testleri neticesinde, Mn bazlı katkı maddesinin yakıta ilave edilme oranındaki optimum değer 40  $\mu\text{mol/l}$  olduğu Şekil 5.9(b)'den görülmektedir.

### 5.2.2. KÇYME İçerikli Yakıt Numunelerinin NO<sub>x</sub> Emisyonları Analizi

NO<sub>x</sub>'ler genellikle, motorun yüksek sıcaklıklardaki çalışma şartlarında oluşmaktadır. NO<sub>x</sub> terimi NO ve NO<sub>2</sub>'nin atmosferdeki toplam yoğunluğunun ifadesidir. Dizel motorlar yanma reaksiyonunu oluştururken diğer motor tiplerine göre daha fazla hava kullanmaktadır. Kullanılan havanın içeriğindeki oksijen, aşırı sıcak çalışma şartlarında ve yanma için yeterli zaman oluştuğunda, azot ile reaksiyona girer. Bu reaksiyon sonucunda NO<sub>x</sub> emisyonları oluşur. NO<sub>x</sub> genellikle, kontrolsüz yanma aşamasında meydana gelmektedir. Biyodizelin oksijen içeriği nedeniyle dizel yakıta kıyasla daha yüksek NO<sub>x</sub> salınımına sebebiyet vereceği belirtilmiştir. Biyodizel ile çalışan motorlarda silindir içi basıncın ve sıcaklık değerlerinin yüksek oluşu, NO<sub>x</sub> emisyonu oluşmasına neden olarak gösterilmiştir [62–64]. NO<sub>x</sub> oluşumu büyük oranda silindir içi sıcaklığa, basınca, tutuşma gecikmesi ve yanma süresine bağlıdır [65–67].

**Tablo 5.10.** KÇYME yakıt türlerinin değişken yükteki NO<sub>x</sub> değerleri

| Yakıt türü    | NO <sub>x</sub> emisyonu (ppm) |      |      |      |
|---------------|--------------------------------|------|------|------|
|               | % 20                           | % 40 | % 60 | % 80 |
| DY            | 290                            | 488  | 632  | 731  |
| B20           | 318                            | 497  | 677  | 752  |
| B35           | 327                            | 525  | 698  | 791  |
| B50           | 349                            | 536  | 721  | 809  |
| B75           | 378                            | 578  | 768  | 835  |
| B100          | 400                            | 620  | 798  | 871  |
| B50+20Mn+D+PG | 347                            | 536  | 720  | 806  |
| B50+40Mn+D+PG | 340                            | 529  | 701  | 777  |
| B50+60Mn+D+PG | 341                            | 528  | 699  | 771  |



**Şekil 5.10.** KÇYME için hazırlanan yakıt türlerinin NO<sub>x</sub> emisyonlarının değişimi;  
(a) Biyodizel içerikli numuneler, (b) Katkı maddeli numuneler

KÇYME'den hazırlanan B20, B35, B50, B75 ve B100 yakıtlarının NO<sub>x</sub> emisyonu değerleri, dizel yakıtın değerleriyle karşılaştırılmıştır. Ölçülen NO<sub>x</sub> emisyonu değerleri Tablo 5.10'da sunulmuştur. Biyodizel yakıtları, dizel yakıtının NO<sub>x</sub> emisyonu değerleriyle kıyaslandığında; B20 yakıtında % 5.1, B35 yakıtında % 9.35, B50 yakıtında % 12.8, B75 yakıtında % 19.6 ve B100 yakıtında % 25.65 oranında bir artış tespit edilmiştir.

Şekil 5.10(a)'da görüldüğü gibi, düşük yüklerde silindir içi sıcaklığının düşük olması, bütün test yakıtları için NO<sub>x</sub> emisyonunun düşük çıkmasına neden olmuştur. Motordaki yükün artışı ile NO<sub>x</sub> emisyonlarında da aynı paralelde bir artış gözlemlenmiştir. Yükün artmasıyla beraber NO<sub>x</sub> emisyon değerlerindeki bu artış; silindir içi sıcaklığın artması ve daha fazla yakıt tüketimi gibi sebeplere bağlanmıştır. Şekil 5.16(a)'daki Egzoz çıkış sıcaklık değerleri ve Şekil 5.9(a)'daki ÖYT değerleri de bu durumu desteklemektedir. Silindir içi sıcaklığın artması, silindir içi hava hareketliliğini oluşturarak NO<sub>x</sub> emisyonlarının oluşumuna zemin hazırlamaktadır [64]. Fakat dizel yakıtı içerisindeki biyodizel oranının artmasıyla sıcaklık değerleri daha da yükselmekte, bu yükselmenin neticesinde ise; basınç, hava hareketliliği gibi oluşumların daha hızlı gerçekleştiği düşünülmektedir. Aynı yük şartlarında NO<sub>x</sub> emisyonu değerleri arasındaki farklılığın bir diğer nedeni ise, yakıt numunelerin ısı değerleri arasındaki farklılıktan kaynaklandığı düşünülmektedir. Biyodizel yakıtlarının, aynı enerjiyi elde edebilmeleri için kütsel olarak daha fazla kullanılması gerekir. Gram cinsinden daha fazla yakıtın kullanılması, NO<sub>x</sub> emisyonlarının artmasına sebep olarak gösterilebilir.

B50 yakıtının NO<sub>x</sub> emisyonu değerleri de, B50+20Mn+PG, B50+40Mn+PG ve B50+60Mn+PG yakıtlarının NO<sub>x</sub> emisyonu değerleriyle karşılaştırılmıştır. Test yakıtlarının NO<sub>x</sub> emisyonu değerleri Tablo 5.10'da sunulmuştur. Katkı ilaveli yakıtlar, B50 yakıtının NO<sub>x</sub>

emisyonu değerleriyle kıyaslandığında; B50+20Mn+PG yakıtında % 0.1, B50+40Mn+PG yakıtında %2.8, B50+60Mn+PG yakıtında %3 oranında bir azalma tespit edilmiştir.

Katkı maddelerinin yapısında oksijen bulunması ve egzoz çıkış sıcaklık değerlerinin yüksek olması sebebiyle, NO<sub>x</sub> emisyonlarının daha yüksek olması beklenmektedir. Ancak beklenenin tersine NO<sub>x</sub> emisyonu değerlerinde bir düşüş olduğu Şekil 5.10(b)'den görölmektedir. Yakıt numunelerine katkı maddelerinin ilave edilmesiyle, setan sayısının artması, ÖYT değerlerinin ve parlama noktasının düşmesi gibi sebeplerin neticesinde NO<sub>x</sub> emisyonlarının azalttığı düşünölmektedir. Nitekim hayvansal iç yağı metil esteri ve karışımlarının kullanıldığı bir çalışmada, özgül yakıt tüketimi ve egzoz çıkış sıcaklığı değerlerinin dizel yakıtına göre yüksek olmasına rağmen daha düşük NO<sub>x</sub> emisyonları elde edilmiştir. Yakıt numunelerinin dizel yakıtına göre yüksek setan sayısına ve daha düşük parlama noktasına sahip olması ile açıklanmıştır. Setan sayısının artması ile NO<sub>x</sub> emisyonlarının azaldığı da ayrıca vurgulanmıştır.[68]. Katkı maddeleri, tutuşma gecikmesini önleyerek azot ile oksijenin reaksiyona gireceği süreyi kısalttığı düşünölmektedir. Katkılı numunelerdeki yanma sürenin kısalması, NO<sub>x</sub> oluşumunun azalmasına sebep olarak gösterilebilir.

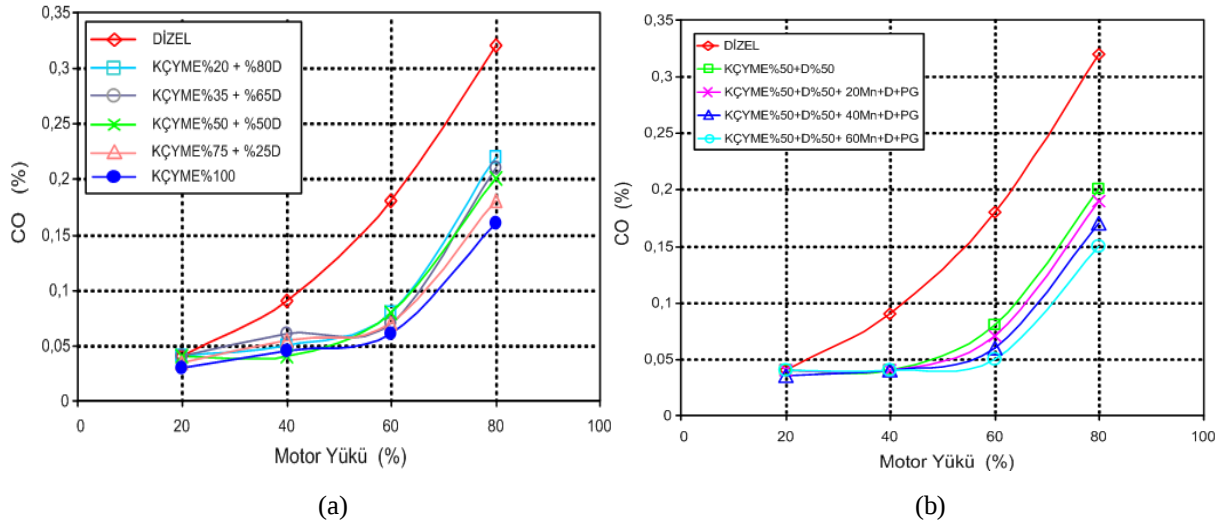
Biyodizel yakıtlarının viskozitelerinin ve parlama noktalarının yüksek olması, tutuşma gecikmesine sebep olmakta, neticesinde azot ile oksijenin reaksiyona girebileceği zaman diliminin oluşturmaktadır [63].

### **5.2.3. KÇYME İçerikli Yakıt Numunelerinin Karbon monoksit (CO) Emisyonları Analizi**

CO emisyonlarının oluşumu dizel motorlarda birçok nedene bağlanabilir. Gaz sıcaklığının düşük olması, yeterli oksijenin bulunmaması ve CO<sub>2</sub>'ye dönüşüm için yeterli zamanın kalmamasından dolayı yanmanın tamamlanmamış olması CO miktarını artırır[69]. Biyodizel yakıtının oksijen içermesi, düşük karbon oranı ve yüksek setan sayısı CO emisyonlarındaki azalmanın temel sebepleridir [45, 70-76].

**Tablo 5.11.** KÇYME için hazırlanan yakıt türlerinin değişken yükteki CO değerleri

| Yakıt türü    | CO emisyonu (%) |       |      |      |
|---------------|-----------------|-------|------|------|
|               | % 20            | % 40  | % 60 | % 80 |
| DY            | 0.04            | 0.09  | 0.18 | 0.32 |
| B20           | 0.04            | 0.05  | 0.08 | 0.22 |
| B35           | 0.04            | 0.06  | 0.07 | 0.21 |
| B50           | 0.04            | 0.04  | 0.08 | 0.2  |
| B75           | 0.035           | 0.055 | 0.07 | 0.18 |
| B100          | 0.03            | 0.045 | 0.06 | 0.16 |
| B50+20Mn+D+PG | 0.04            | 0.04  | 0.07 | 0.19 |
| B50+40Mn+D+PG | 0.035           | 0.04  | 0.06 | 0.17 |
| B50+60Mn+D+PG | 0.04            | 0.04  | 0.05 | 0.15 |



**Şekil 5.11.** KÇYME için hazırlanan yakıt türlerinin CO emisyonlarının değişimi;

(a) Biyodizel içerikli numuneler, (b) Katkı maddeli numuneler

KÇYME'den hazırlanan B20, B35, B50, B75 ve B100 yakıtlarının ölçülen CO değerleri, dizel yakıtın değerleriyle karşılaştırılmıştır. Ölçülen CO değerleri Tablo 5.11'de sunulmuştur. Biyodizel yakıtları, dizel yakıtının CO değerleriyle kıyaslandığında; B20 yakıtında % 38, B35 yakıtında % 39.5, B50 yakıtında % 42.8, B75 yakıtında % 46 ve B100 yakıtında % 53.5 oranında bir azalma tespit edilmiştir.

Tüm test yakıtları için motordaki yük arttıkça CO emisyonlarının da aynı paralelde arttığı Şekil 5.11(a)'dan görülmektedir. Yükün artmasıyla beraber CO emisyonu değerlerindeki bu artış, kütleli olarak daha fazla yakıt kullanılmasına bağlanmıştır. Yükün artmasıyla beraber gram cinsinden daha fazla yakıt kullanılması CO emisyonlarının artışına

sebepler olarak gösterilebilir. Biyodizel yakıtlarının CO emisyonlarının, dizel yakıtına göre daha düşük değerlerde olduğu Şekil 5.11(a)'da görülmektedir. Biyodizel yakıtının setan sayısının yüksek olması ve kimyasal bağ yapısında oksijen bulundurması biyodizel yakıtlarının CO emisyonu değerlerindeki azalmaya sebep olduğu düşünülmektedir. Test yakıtlarının CO emisyon değerleri %20 yükte benzer değerde iken, %40, %60, %80 yük şartlarında, yakıtların CO emisyon değerleri arasında belirgin farklılıklar olduğu Şekil 5.11(a)'dan görülmektedir. Dizel yakıtı içerisindeki biyodizel oranının arttırılmasıyla, setan sayısı ve oksijen içeriği gibi değerlerin arttığı ve bu durumun ise test yakıtları arasındaki CO emisyonlarının farklı değerlerde oluşmasına sebep olduğu düşünülmektedir. Yakıtların yanma performansını etkileyecek özellikleri ne kadar iyi olursa, CO emisyon değerlerinin de o nispette düşük olacağı düşünülmektedir.

B50 yakıtının CO değerleri de, B50+20Mn+PG, B50+40Mn+PG ve B50+60Mn+PG yakıtlarının CO değerleriyle karşılaştırılmıştır. Test yakıtlarının CO değerleri Tablo 5.11'de sunulmuştur. Katkı ilaveli yakıtlar, B50 yakıtının CO değerleriyle kıyaslandığında; B50+20Mn+PG yakıtında % 5, B50+40Mn+PG yakıtında % 14.9, B50+60Mn+PG yakıtında % 22 oranında bir azalma tespit edilmiştir.

Katkı ilaveli yakıtların CO emisyonu değerleri B50 yakıtına göre daha düşük olduğu Şekil 5.11(b)'de görülmektedir. Katkı maddeleri, ilave edildikleri yakıtın; setan sayısı, parlama noktası, viskozite ve yoğunluk gibi özelliklerini iyileştirmesiyle, B50 yakıtına göre daha iyi bir yanma performansı sağladığı düşünülmektedir [45, 66, 69–74]. Şekil 5.11(b)'de görüldüğü gibi, yakıtta Mn ilavesi miktarının artırılmasıyla, CO emisyon değerleri düşmüştür. Mn bazlı katkı maddesinin, yakıtların yanma performansını etkileyecek özelliklerini iyileştirmektedir [70]. Yanma performansının iyileşmesi, CO emisyonunun CO<sub>2</sub>'ye dönüşümü için zaman kazandırdığı düşünülmektedir. Katkı ilaveli numunelerin CO<sub>2</sub> emisyonlarının B50 yakıtına göre yüksek çıkması, belirtilen bu durumu desteklemektedir.

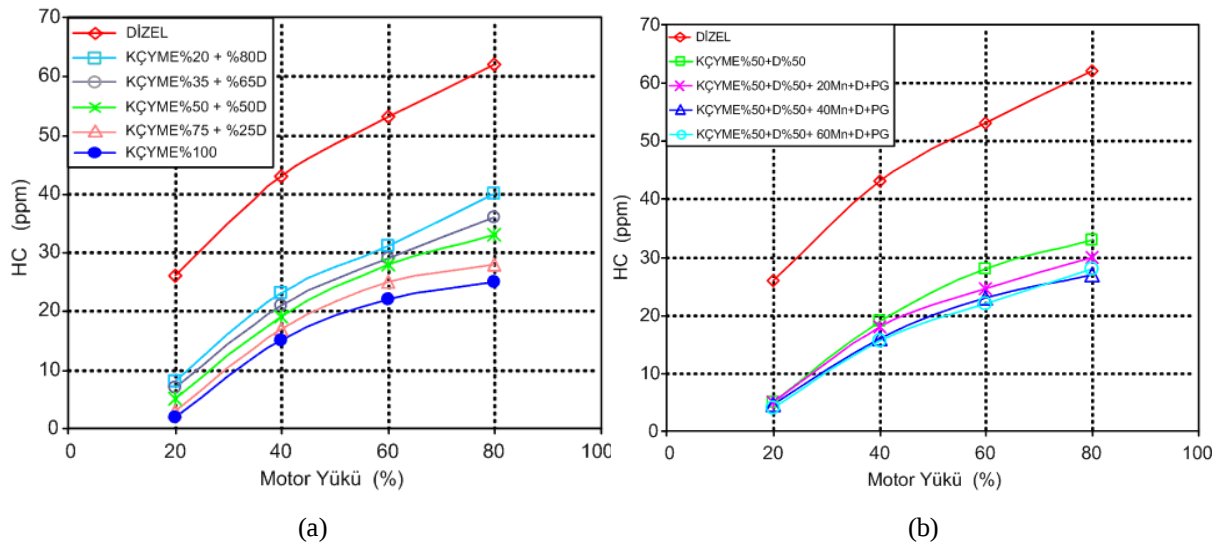
#### **5.2.4. KÇYME İçerikli Yakıt Numunelerinin Hidrokarbon (HC) Emisyonları Analizi**

HC emisyonlarının oluşmasında iki önemli unsur ön plana çıkmaktadır. Birincisi, önceki çevrimden kalan yanmış gazlardır[77]. Motordaki iş sonunda, enjektör ucuna yakın kör noktalarda ve enjektör deliğinde bir miktar da olsa, bir sonraki çevrime yanmış gazlar kalır. Yanma odasında kalan bu gazlar bir sonraki çevrimde sıkıştırılan hava ile karışır. Bu durum

yeni hava-yakıt karışımının oksijen oranını düşürerek HC emisyonlarının oluşmasına sebebiyet vermektedir [78].

**Tablo 5.12.** KÇYME için hazırlanan yakıt türlerinin değişken yükteki HC değerleri

| Yakıt türü    | HC emisyonu (ppm) |      |      |      |
|---------------|-------------------|------|------|------|
|               | % 20              | % 40 | % 60 | % 80 |
| DY            | 26                | 43   | 53   | 62   |
| B20           | 8                 | 23   | 31   | 40   |
| B35           | 7                 | 21   | 29   | 36   |
| B50           | 5                 | 19   | 28   | 33   |
| B75           | 3                 | 17   | 25   | 28   |
| B100          | 2                 | 15   | 22   | 25   |
| B50+20Mn+D+PG | 5                 | 19   | 26   | 30   |
| B50+40Mn+D+PG | 4                 | 17   | 24   | 25,5 |
| B50+60Mn+D+PG | 3                 | 17   | 23   | 28   |



**Şekil 5.12.** KÇYME için hazırlanan yakıt türlerinin HC emisyonlarının değişimi;

(a) Biyodizel içerikli numuneler, (b) Katkı maddeli numuneler

KÇYME'den hazırlanan B20, B35, B50, B75 ve B100 yakıtlarının ölçülen HC değerleri, dizel yakıtın değerleriyle karşılaştırılmıştır. Ölçülen HC emisyonu değerleri Tablo 5.12'de sunulmuştur. Biyodizel yakıtları, dizel yakıtının HC emisyonu değerleriyle kıyaslandığında; B20 yakıtında % 44.5, B35 yakıtında % 50, B50 yakıtında % 53.5, B75 yakıtında % 60.1 ve B100 yakıtında % 65 oranında bir azalma tespit edilmiştir.

Motorda biyodizel yakıtının kullanılmasıyla HC emisyonlarında azalma olduğu Şekil 5.12(a)'dan görülmektedir. Bu azalmanın, biyodizel yakıtlarının yapısındaki oksijenden kaynaklandığı düşünülmektedir. Biyodizel yakıtının oksijen içeriğinin fazla olması yanma reaksiyonuna ek katkı sağlayarak, HC emisyonlarının azalmasına neden olduğu düşünülmektedir. Test edilen yakıt numunelerinin HC emisyon değerlerinde belirgin farklılığın olduğu Şekil 5.12(a)'dan görülmektedir. Her yakıt numunesinin kimyasal içeriğinde değişken oranda oksijen bulunması ve dizel yakıt içerisindeki biyodizel oranının artmasıyla setan sayısı değerinin de aynı paralelde artış göstermesi bu belirgin farklılığın sebebi olarak gösterilebilir. Motordaki yükün artmasıyla beraber tüm yakıtların CO emisyon değerlerinde artış gözlenmiştir. Bu artışın nedeni; yükün artmasına paralel olarak kütleli yakıt sarfiyatının artması şeklinde açıklanabilir.

Literatürde yapılan çalışmalarda; dizel yakıtının, yanma odasında hava ile istenen düzeyde bir karışım oluşturmaması neticesinde yüksek CO ve HC emisyonlarının olduğu belirtilmiştir. Biyodizel karışımlı yakıtların yapısında oksijen bulunması sebebiyle; CO, HC ve duman emisyonlarında azalma tespit edilmiştir. Çünkü yakıtın oksijen içeriği yanma sırasında ek oksijen sağlayarak tam yanmayı geliştirmekte ve bu durumun HC emisyonlarının azalmasına katkı sağladığı belirtilmiştir. Bununla beraber setan sayısı, kaynama noktası, kükürt ve aromatik bileşen içeriği gibi özelliklerin de CO, HC ve duman emisyonlarındaki değişim üzerinde etkili olduğunu ifade edilmiştir [70,71,77,78].

B50 yakıtının HC emisyonu değerleri de, B50+20Mn+PG, B50+40Mn+PG ve B50+60Mn+PG yakıtlarının HC emisyonu değerleriyle karşılaştırılmıştır. Test yakıtlarının HC emisyonu değerleri Tablo 5.12'de sunulmuştur. Katkı ilaveli yakıtlar, B50 yakıtının HC emisyonu değerleriyle kıyaslandığında; B50+20Mn+PG yakıtında % 4.9, B50+40Mn+PG yakıtında % 16.1, B50+60Mn+PG yakıtında % 15.6 oranında bir azalma tespit edilmiştir.

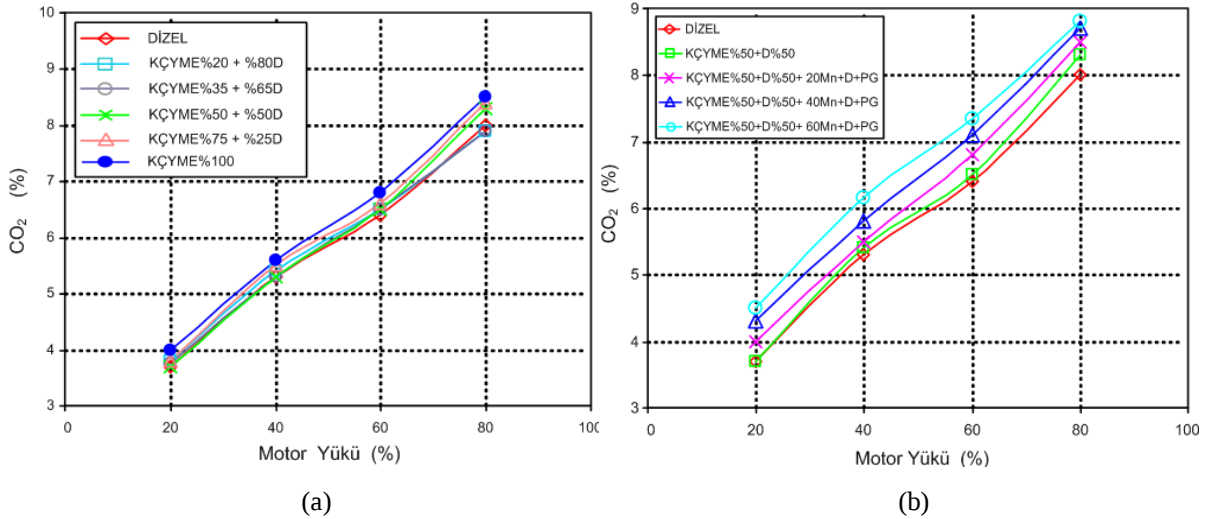
Test yakıtlarına katkı maddelerinin ilave edilmesiyle HC emisyon değerleri B50 yakıtına kıyasla azalma olduğu Şekil 5.12(b)'de görülmüştür. Katkı maddeleri yakıtın setan sayısını ve oksijen içeriğini arttırdığı ve neticesinde de iyi bir yanma karakteristiğinin oluşmasına katkı sağladığı düşünülmektedir. Propilen glikolun ve dodekanolun oksijen bakımından zengin bir yapıya sahip olması, Mn bazlı katkı maddesinin ise setan sayısı üzerinde olumlu bir katkı sağladığı düşünülmektedir.

### 5.2.5. KÇYME İçerikli Yakıt Numunelerinin Karbondioksit (CO<sub>2</sub>) Emisyonları Analizi

CO<sub>2</sub> emisyonları doğrudan yanma ile ilgilidir. Dizel bir motor düşük devirde çalışıyorsa, yanma performansı da düşüktür. Çünkü düşük devirlerde silindir içi sıcaklık değeri optimum şartlarda olmadığı için kötü bir yanma reaksiyonu gerçekleşmektedir [78].

**Tablo 5.13.** KÇYME için hazırlanan yakıt türlerinin değişken yükteki CO<sub>2</sub> değerleri

| Yakıt türü    | CO <sub>2</sub> emisyonu (%) |      |      |      |
|---------------|------------------------------|------|------|------|
|               | % 20                         | % 40 | % 60 | % 80 |
| DY            | 3.7                          | 5.3  | 6.4  | 8    |
| B20           | 3.8                          | 5.4  | 6.5  | 7.9  |
| B35           | 3.75                         | 5.3  | 6.5  | 7.9  |
| B50           | 3.7                          | 5.3  | 6.5  | 8.3  |
| B75           | 3.8                          | 5.5  | 6.6  | 8.4  |
| B100          | 4                            | 5.6  | 6.8  | 8.5  |
| B50+20Mn+D+PG | 4                            | 5.5  | 6.8  | 8.5  |
| B50+40Mn+D+PG | 4.3                          | 5.8  | 7.1  | 8.7  |
| B50+60Mn+D+PG | 4.5                          | 6.15 | 7.35 | 8.8  |



**Şekil 5.13.** KÇYME için hazırlanan yakıt türlerinin CO<sub>2</sub> emisyonlarının değişimi;

(a) Biyodizel içerikli numuneler, (b) Katkı maddeli numuneler

KÇYME'den hazırlanan B20, B35, B50, B75 ve B100 yakıtlarının ölçülen CO<sub>2</sub> emisyonu değerleri, dizel yakıtın değerleriyle karşılaştırılmıştır. Ölçülen CO<sub>2</sub> emisyonu

değerleri Tablo 5.13’de sunulmuştur. Biyodizel yakıtları, dizel yakıtının CO<sub>2</sub> emisyonu değerleriyle kıyaslandığında; B20 yakıtında % 1, B35 yakıtında % 0.1, B50 yakıtında % 1.9, B75 yakıtında % 3.8 ve B100 yakıtında % 6.3 oranında bir artış tespit edilmiştir.

Şekil 5.13(a)’dan, test yakıtlarının hepsinde motordaki yükün artmasıyla beraber CO<sub>2</sub> emisyon değerlerinde artış olduğu görülmektedir. Motordaki yükün artmasına paralel bir artış gösteren ÖYT ve egzoz çıkış sıcaklığı değerlerinin, CO<sub>2</sub> emisyonlarındaki artışa sebebiyet verdiği düşünülmektedir. Tablo 5.13’deki veriler incelendiğinde, dizel yakıtının içerisindeki biyodizel oranının artmasıyla CO<sub>2</sub> emisyon değerleri artmıştır. Dizel yakıtına kıyasla biyodizelin yapısında daha fazla bulunan oksijenin, silindir içindeki yanma esnasında karbon atomu ile reaksiyona girerek CO<sub>2</sub> emisyonlarını oluşturduğu düşünülmektedir. Ayrıca Şekil 5.14(a)’da görüldüğü gibi yükün artmasıyla O<sub>2</sub> emisyonu değerlerinin düşmesi de bu durumu desteklemektedir.

B50 yakıtının emisyonu CO<sub>2</sub> emisyonu değerleri de, B50+20Mn+PG, B50+40Mn+PG ve B50+60Mn+PG yakıtlarının CO<sub>2</sub> emisyonu değerleriyle karşılaştırılmıştır. Test yakıtlarının CO<sub>2</sub> emisyonu değerleri Tablo 5.13’de sunulmuştur. Katkı ilaveli yakıtlar, B50 yakıtının CO<sub>2</sub> emisyonu değerleriyle kıyaslandığında; B50+20Mn+PG yakıtında % 5.9, B50+40Mn+PG yakıtında % 7.55, B50+60Mn+PG yakıtında % 12.8 oranında bir artış tespit edilmiştir.

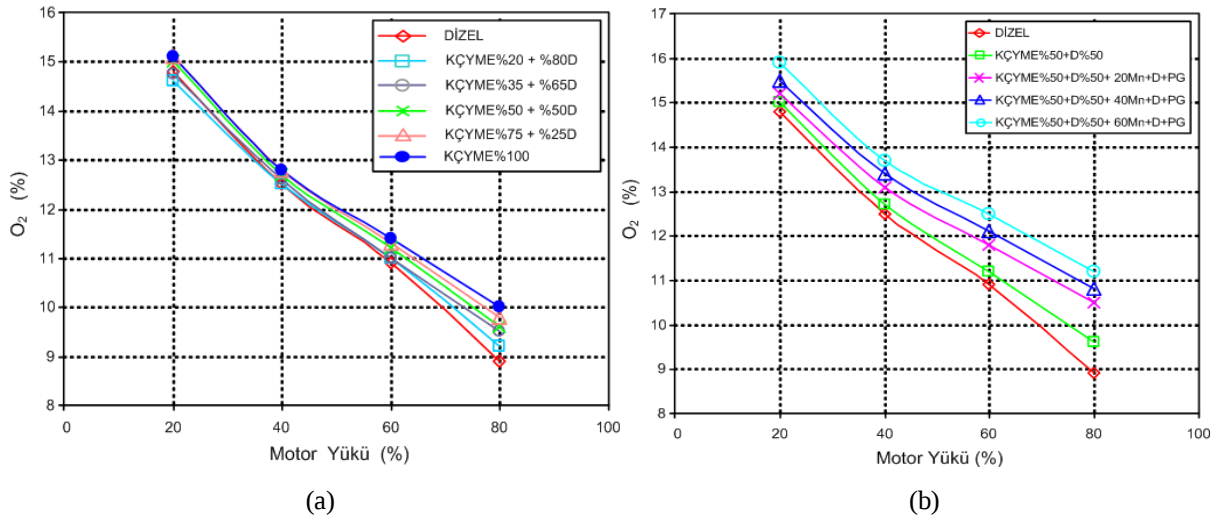
Şekil 5.13(b)’den görüldüğü gibi, katkı maddeleri, ilave edildikleri yakıtlarında CO<sub>2</sub> emisyon değerlerinin artışına sebep olmuştur. Katkı maddeleri, ilave edildikleri yakıtların oksijen içeriğini arttırmaktadır. Yanma reaksiyonu esnasında ortamda oksijen miktarının fazla olması, daha fazla karbon atomu oksitlenmesine ve bunun neticesinde de CO<sub>2</sub> emisyonlarının artmasına neden olduğu düşünülmektedir. Ayrıca katkı maddeleri, numunelerin setan sayısı, viskozite, yoğunluk ve parlama noktası gibi özellikleri iyileştirerek yanma verimine katkı sağlamaktadır [45,70-76]. İyi bir yanma reaksiyonunun oluşması, silindir içi sıcaklığı arttırırken beraberinde de CO<sub>2</sub> emisyon değerlerinin yükselmesine sebep olduğu düşünülmektedir.

#### **5.2.6. KÇYME Yakıt Numunelerinin Oksijen (O<sub>2</sub>) Emisyonları Analizi**

İçten yanmalı motorlarda enerji, hava-yakıt karışımının yanması sonucu elde edilmektedir. Hava ve yakıtın içerisinde bulunan oksijen motorda yanma reaksiyonu sonucunda oluşan bir emisyon ürünüdür.

**Tablo 5.14.** KÇYME yakıt türlerinin değişken yükteki O<sub>2</sub> değerleri

| Yakıt türü    | O <sub>2</sub> emisyonu (ppm) |      |      |      |
|---------------|-------------------------------|------|------|------|
|               | % 20                          | % 40 | % 60 | % 80 |
| DY            | 14.8                          | 12.5 | 10.9 | 8.9  |
| B20           | 14.6                          | 12.5 | 11   | 9.2  |
| B35           | 14.75                         | 12.6 | 11   | 9.5  |
| B50           | 15                            | 12.7 | 11.2 | 9.6  |
| B75           | 15.1                          | 12.8 | 11.3 | 9.8  |
| B100          | 15.1                          | 12.8 | 11.4 | 10   |
| B50+20Mn+D+PG | 15.2                          | 13.1 | 11.8 | 10.5 |
| B50+40Mn+D+PG | 15.5                          | 13.4 | 12.1 | 10.8 |
| B50+60Mn+D+PG | 15.9                          | 13.7 | 12.5 | 11.2 |



**Şekil 5.14.** KÇYME için hazırlanan yakıt türlerinin O<sub>2</sub> emisyonlarının değişimi;

(a) Biyodizel içerikli numuneler, (b) Katkı maddeli numuneler

KÇYME'den hazırlanan B20, B35, B50, B75 ve B100 yakıtlarının ölçülen O<sub>2</sub> emisyonu değerleri, dizel yakıtın değerleriyle karşılaştırılmıştır. Ölçülen O<sub>2</sub> emisyonu değerleri Tablo 5.14'de sunulmuştur. Biyodizel yakıtları, dizel yakıtının O<sub>2</sub> değerleriyle kıyaslandığında; B20 yakıtında % 0.9, B35 yakıtında % 2, B50 yakıtında % 3.1, B75 yakıtında % 4.3 ve B100 yakıtında % 5 oranında bir artış tespit edilmiştir.

Tüm test yakıtları için motordaki yük arttıkça O<sub>2</sub> emisyonlarında azalma olduğu Şekil 5.14(a)'dan görülmektedir. Test yakıtlarının %20 yükte yüksek olan O<sub>2</sub> emisyonu değerleri yüklemenin artmasıyla ters orantılı olarak azalmıştır. %20 yükte silindir içi sıcaklığın düşük olması nedeniyle, oksijenin karbon atomu ile reaksiyon oluşturamadığı düşünülmektedir. %20 yükte karbon oksijen oksitlenmesi gerçekleşmemesi neticesinde, egzoz gazlarındaki O<sub>2</sub>

miktarının arttığı, CO<sub>2</sub> miktarının da azaldığı Şekil 5.13(a) ve Şekil 5.14(a)'dan görülmektedir. Dizel yakıt içerisindeki biyodizel oranının artmasıyla, O<sub>2</sub> emisyonları da aynı paralelde arttığı Şekil 5.14(a)'dan görülmektedir. Biyodizelin dizel yakıtına göre daha fazla oksijen içermesi, biyodizel yakıtlarında O<sub>2</sub> emisyonlarının yüksek çıkmasına sebep olduğu düşünülmektedir. Biyodizel kullanıldığında elde edilen CO emisyonlarının daha düşük olması bu düşüncüyü ayrıca desteklemektedir.

B50 yakıtının O<sub>2</sub> emisyonu değerleri de, B50+20+PG, B50+40Mn+PG ve B50+60Mn+PG yakıtlarının O<sub>2</sub> emisyonu değerleriyle karşılaştırılmıştır. Test yakıtlarının O<sub>2</sub> emisyonu değerleri Tablo 5.14'de sunulmuştur. Katkı ilaveli yakıtlar, B50 yakıtının O<sub>2</sub> emisyonu değerleriyle kıyaslandığında; B50+20Mn+PG yakıtında % 4.4, B50+40Mn+PG yakıtında % 6.9, B50+60Mn+PG yakıtında %9.6 oranında bir artış tespit edilmiştir.

Şekil 5.14(b)'de görüldüğü gibi katkılı yakıt numunelerinde düşük yük şartlarında yüksek olan oksijen miktarı, yüklemenin artmasıyla orantılı olarak düşmüştür. Yükün artmasıyla beraber O<sub>2</sub> emisyon değerlerinin tüm test yakıtları için düşmesinin nedenini, %20 ile %80 yük değerleri arasında O<sub>2</sub> ile CO<sub>2</sub> emisyon değerlerinin ters orantılı olması şeklinde açıklanabilir. Şekil 5.13(b)'de ve Şekil 5.14(b)'de görüldüğü gibi, O<sub>2</sub> değerlerinin yüksek olduğu durumda CO<sub>2</sub> değerleri düşük, O<sub>2</sub> değerlerinin düşük olduğu durumda CO<sub>2</sub> değerleri yüksek olduğu görülmektedir. Şekil 5.14(b)'den görüldüğü gibi, katkı maddelerinin ilavesi ile O<sub>2</sub> emisyonu değerlerinde artış olmuştur. Bu artışın, gerek biyodizel yakıtındaki gerekse katkı maddelerindeki oksijen içeriğinin fazla olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Katkı maddelerinin %20 yük durumundan itibaren, O<sub>2</sub> emisyon değerlerinde farklılığa sebebiyet verdiği Şekil 5.14(b)'den görülmektedir. Her ne kadar karbon atomu oksitlemesi sonucu CO<sub>2</sub>'ye dönüşüm olsa da katkı ilaveli yakıtlardaki oksijen miktarının fazla olması bazı oksijen gazlarının karbon atomu ile bağ kuramamasına sebep olduğu düşünülmektedir. Katkılı numunelerin içeriğindeki oksijen miktarının, B50 yakıtı ile katkı ilaveli yakıtların O<sub>2</sub> emisyon değerleri arasındaki farklılığı oluşturduğu düşünülmektedir.

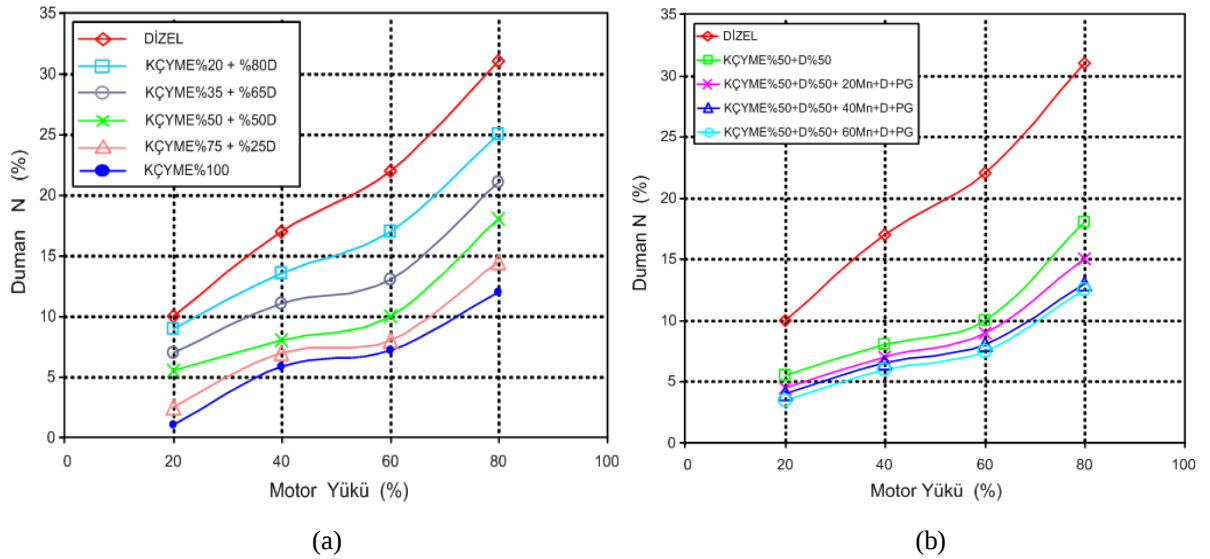
#### **5.2.7. KÇYME İçerikli Yakıt Numunelerinin Duman (İs) Emisyonları Analizi**

Alev içerisindeki türbülanslı karışım alanları ve Sıcaklık is oluşumunu etkileyen önemli parametrelerdir. Bölgesel sıcaklık değişimi ve oksijen konsantrasyonu dağılımı is oluşum mekanizmasının temel fiziksel büyüklükleridir. Bununla beraber yakıtın yüksek oksijen

içeriği, düşük C/H oranı ve aromatik bileşenlerin olmaması duman oluşumunda önemli bir etkiye sahiptir [76].

**Tablo 5.15.** KÇYME için hazırlanan yakıt türlerinin değişken yükteki duman emisyon değerleri

| Yakıt türü    | Duman emisyonu (%) |      |      |      |
|---------------|--------------------|------|------|------|
|               | % 20               | % 40 | % 60 | % 80 |
| DY            | 10                 | 17   | 22   | 31   |
| B20           | 9                  | 13.5 | 17   | 25   |
| B35           | 7                  | 11   | 13   | 21   |
| B50           | 5.5                | 8    | 10   | 18   |
| B75           | 2.5                | 7    | 8    | 14.5 |
| B100          | 1                  | 5.8  | 7.2  | 12   |
| B50+20Mn+D+PG | 4.5                | 7    | 9    | 15   |
| B50+40Mn+D+PG | 4                  | 6.5  | 8    | 13   |
| B50+60Mn+D+PG | 3.5                | 6    | 7.5  | 12.5 |



**Şekil 5.15.** KÇYME için hazırlanan yakıt türlerinin duman emisyonlarının değişimi;  
(a) Biyodizel içerikli numuneler, (b) Katkı maddeli numuneler

KÇYME'den hazırlanan B20, B35, B50, B75 ve B100 yakıtlarının ölçülen duman emisyon değerleri, dizel yakıtın değerleriyle karşılaştırılmıştır. Ölçülen duman emisyonu değerleri Tablo 5.15'de sunulmuştur. Biyodizel yakıtları, dizel yakıtının duman emisyon değerleriyle kıyaslandığında; B20 yakıtında % 19.5, B35 yakıtında % 35, B50 yakıtında % 48.5, B75 yakıtında % 60 ve B100 yakıtında % 67.5 oranında bir azalma tespit edilmiştir.

Biyodizel kullanıldığında duman emisyonu değerlerinin dizel yakıtına göre düşük çıkmasının temel nedeni, biyodizelin oksijen bakımından zengin bir yapıya sahip olması olarak açıklanabilir. Ayrıca dizel yakıtına kıyasla daha düşük karbon atomu içeren biyodizel, yapısındaki oksijenden dolayı yanma sırasında oksitlenme miktarını arttırarak, duman emisyonlarının oluşumunu azalttığı düşünülmektedir. Nitekim; dizel yakıt içerisindeki biyodizel oranının artmasıyla duman emisyonlarının azaldığı Şekil 5.15(a)'da görülmektedir.

Biyodizelin oksijen içeriğinden dolayı, duman emisyonlarında önemli bir düşüş sağlandığı belirtilmiştir [77]. Ayrıca karbon içeriğinin düşük olmasından dolayı duman emisyonlarının azaldığı da belirtilmiştir. Oksijen içerikli yakıtlar silindir içi sıcaklığı arttırmaktadır. Bu artışın yanma verimini olumlu etkileyerek bölgesel sıcaklık değişimini önlediği düşünülmektedir. Bölgesel sıcaklık değişimi ve oksijen konsantrasyonu dağılımı is oluşumunu tetikleyen temel mekanizmalardır. [76].

B50 yakıtının duman emisyon değerleri de, B50+20Mn+PG, B50+40Mn+PG ve B50+60Mn+PG yakıtlarının duman emisyon değerleriyle karşılaştırılmıştır. Test yakıtlarının duman emisyonu değerleri Tablo 5.15'de sunulmuştur. Katkı ilaveli yakıtlar, B50 yakıtının duman emisyon değerleriyle kıyaslandığında; B50+20Mn+PG yakıtında % 14, B50+40Mn+PG yakıtında %23.5, B50+60Mn+PG yakıtında % 28.5 oranında bir azalma tespit edilmiştir.

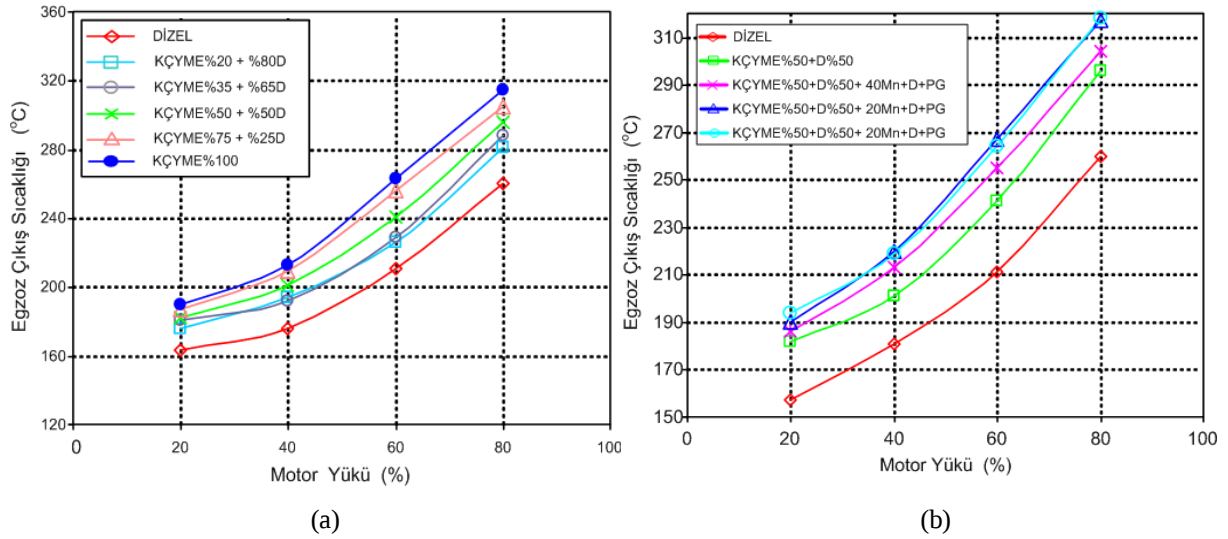
Şekil 5.15(b)'den görüldüğü gibi, katkı maddelerinin ilavesi ile duman emisyonu değerlerinde azalma olmuştur. Kullanılan katkı maddelerinin oksijen oranı biyodizel yakıtlarına kıyasla daha fazladır. B50 yakıtının Mn, propilen glikol ve dodekanol gibi katkı maddeleriyle desteklenmesi karbon oranını düşürüp oksijen oranı arttırmaktadır. Oksijen miktarının artması, yanma sırasında oksitlenme reaksiyonu hızlandırarak duman oluşumu azalttığı düşünülmektedir. Ayrıca yakıtı ilave edilen katkı maddeleri yanma reaksiyonuna istikrarlı bir yapı kazandırıp, alev içerisinde türbülanslı karışım alanları ve duman emisyonları oluşumlarını engellediği düşünülmektedir.

### **5.2.8. KÇYME İçerikli Yakıt Numunelerinin Egzoz Gazları Sıcaklık Analizi**

İçten yanmalı motorlarda silindir içerisinde yakıtın yanması sonucu elde edilen ısı enerjisinin bir kısmı soğutma, egzoz ve sürtünme yolu ile kaybedilmektedir. Kaybedilen bu enerji kayıplar neticesinde geriye kalan ısı enerjisi mekanik enerjiye dönüştürülerek motordaki güç elde edilmektedir.

**Tablo 5.16.** KÇYME için hazırlanan yakıt türlerinin değişken yükteki egzoz çıkış sıcaklığı değerleri

| Yakıt türü    | Egzoz çıkış sıcaklığı (°C) |      |      |      |
|---------------|----------------------------|------|------|------|
|               | % 20                       | % 40 | % 60 | % 80 |
| DY            | 163                        | 176  | 211  | 260  |
| B20           | 176                        | 194  | 226  | 281  |
| B35           | 181                        | 192  | 229  | 288  |
| B50           | 182                        | 201  | 241  | 296  |
| B75           | 187                        | 209  | 256  | 305  |
| B100          | 190                        | 213  | 263  | 315  |
| B50+20Mn+D+PG | 186                        | 213  | 255  | 304  |
| B50+40Mn+D+PG | 190                        | 220  | 267  | 317  |
| B50+60Mn+D+PG | 194                        | 219  | 264  | 318  |



**Şekil 5.16.** KÇYME için hazırlanan yakıt türlerinin egzoz çıkış sıcaklığı değişimi;

(a) Biyodizel içerikli numuneler, (b) Katkı maddeli numuneler

KÇYME'den hazırlanan, B20, B35, B50, B75 ve B100 yakıtlarının ölçülen egzoz çıkış sıcaklığı değerleri, dizel yakıtın değerleriyle ile karşılaştırılmıştır. Ölçülen egzoz çıkış sıcaklığı değerleri Tablo 5.16'da sunulmuştur. Biyodizel yakıtları, dizel yakıtının egzoz çıkış sıcaklığı değerleriyle kıyaslandığında; B20 yakıtında % 8.5, B35 yakıtında % 10, B50 yakıtında % 14, B75 yakıtında %18.5 ve B100 yakıtında % 21.5 oranında bir artış tespit edilmiştir.

Şekil 5.16(a)'dan görüldüğü gibi, motordaki yükün artmasıyla beraber test yakıtlarının egzoz çıkış sıcaklıkları artmıştır. Motorda üretilmesi gereken gücü arttırabilmek için daha fazla ısı enerjisine ihtiyaç duyulmaktadır. Yanma odasındaki ısı enerjisinin yüksek olması,

egzoz çıkış sıcaklığının yüksek olmasına sebep olduğu düşünülmektedir. Motorda biyodizel yakıtının kullanılmasıyla egzoz çıkış sıcaklığının arttığı Şekil 5.16(a)'dan görülmektedir. Dizel yakıtı ile biyodizel yakıtının egzoz çıkış sıcaklığı değerlerindeki farklılığa, biyodizel yakıtının oksijen içeriği ve setan sayısının yüksek olması gibi özelliklerden kaynaklandığı düşünülmektedir. Test yakıtlarının, içeriğindeki oksijen nispetinde iyi bir yanma performansı sergileyerek, farklı değerlerde egzoz çıkış sıcaklığı oluşturduğu düşünülmektedir. Ayrıca biyodizelin sahip olduğu yüksek viskozite ve setan sayısından dolayı daha yavaş ve uzun bir yanmanın gerçekleşiyor olması biyodizel kullanımında daha yüksek egzoz sıcaklığın oluşmasına sebep olarak gösterilebilir. Dizel motorlarda yakıt olarak biyodizel kullanıldığında yanmanın daha uzun devam etmesinden dolayı egzoz sıcaklığının daha yüksek çıktığını belirtmiştir [78]. Egzoz gazı sıcaklığının tutuşma gecikmesinden etkilendiğini ve biyodizelin setan sayısının yüksek olmasından dolayı daha düşük tutuşma gecikmesi periyodu sergilediğini ve bunun da biyodizel kullanıldığında egzoz gazı sıcaklığını artırdığını belirtmiştir [13].

B50 yakıtının egzoz çıkış sıcaklığı değerleri de, B50+20Mn+PG, B50+40Mn+PG ve B50+60Mn+PG yakıtlarının egzoz çıkış sıcaklığı değerleriyle karşılaştırılmıştır. Test yakıtlarının egzoz çıkış sıcaklığı değerleri Tablo 5.16'da sunulmuştur. Katkı ilaveli yakıtlar, B50 yakıtının egzoz çıkış sıcaklığı değerleriyle kıyaslandığında; B50+20Mn+PG yakıtında % 4.1, B50+40Mn+PG yakıtında % 8, B50+60Mn+PG yakıtında %8.15 oranında bir artış tespit edilmiştir.

Şekil 5.16(b)'den görüldüğü gibi, B50 yakıtına ilave edilen Mn, dodekanol ve propilen glikol gibi katkı maddeleri egzoz çıkış sıcaklık değerlerini arttırmıştır. Katkı maddeleri yakıtın setan sayısını ve oksijen içeriğini arttırdığı ve neticesinde de iyi bir yanma karakteristiğinin oluşmasına katkı sağladığı düşünülmektedir. Yüksek setan sayısı daha düşük tutuşma gecikmesi periyodu oluşturduğundan egzoz gazı sıcaklığı artmaktadır. Yakıtın kimyasal bağ yapısındaki oksijen miktarının artması, yakıtlara olumlu bir yanma performansı kazandırarak, egzoz çıkış sıcaklığını arttırmaktadır[13,78].

### 5.3. HYME İçin Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Haşhaş yağından elde edilen biyodizeller (HYME), belli oranlarda dizel yakıt ile karıştırılarak beş farklı yakıt numunesi elde edilmiştir. Ayrıca B50 yakıtına değişik özellikteki katkı maddeleri ilave edilerek, numunelerin ÖYT ve egzoz emisyon değerleri test edilmiştir. Test işleminin sonunda elde edilen değerler karşılaştırmalı bir şekilde aşağıda sunulmuştur.

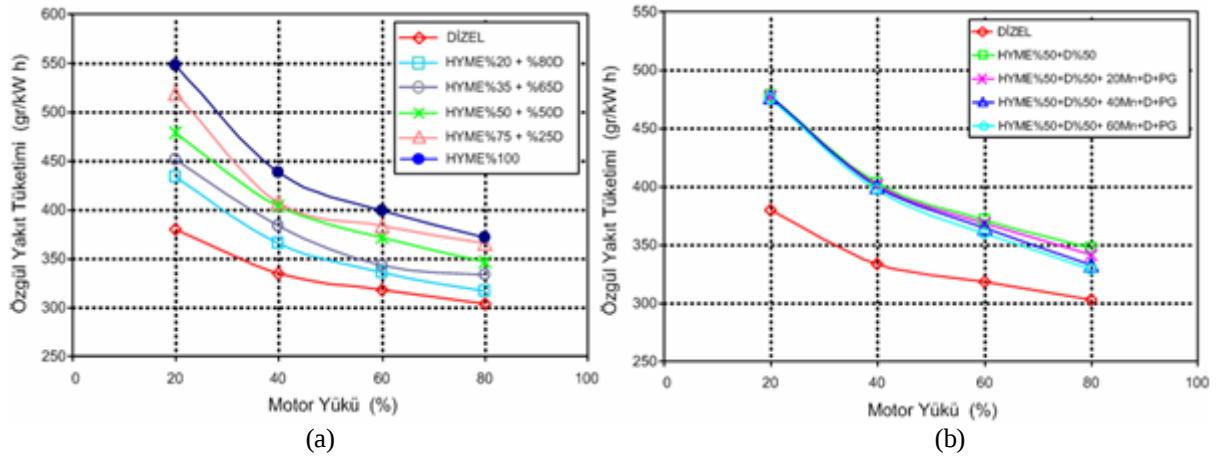
#### 5.3.1. HYME İçerikli Yakıt Numunelerinin Özgül Yakıt Tüketimi Analizi

Özgül yakıt tüketimi, birim güç başına tüketilen kütleli yakıt miktarı olarak tanımlanmaktadır.

Bu çalışmada, sabit yükte, devir değişimine bağlı özgül yakıt tüketimi (ÖYT) ölçümü yerine, sabit hızda, yük değişimine bağlı ÖYT ölçümü gerçekleştirilmiştir. Test motoru, 1500 dev/dak.'lık sabit hızda, %20, %40, %60 ve %80 değişken yük şartlarında çalıştırılarak ÖYT değerleri ölçülmüştür. Motor devri, motor test düzeneğinde bulunan elektronik hız kontrol ünitesiyle sabit tutulmuştur. Elektronik hız kontrol ünitesi, motor devrini sabit tutmak için, yükün artışına bağlı olarak tüketilecek yakıtın miktarını otomatik olarak arttırmaktadır.

**Tablo 5.17.** HYME yakıt türlerinin değişken yükteki ÖYT değerleri

| Yakıt türü    | ÖYT değeri (gr/kWh) |      |      |      |
|---------------|---------------------|------|------|------|
|               | % 20                | % 40 | % 60 | % 80 |
| DY            | 380                 | 334  | 318  | 303  |
| B20           | 433                 | 366  | 336  | 317  |
| B35           | 451                 | 383  | 343  | 333  |
| B50           | 478                 | 403  | 371  | 347  |
| B75           | 519                 | 407  | 383  | 365  |
| B100          | 548                 | 438  | 399  | 372  |
| B50+20Mn+D+PG | 477                 | 401  | 368  | 341  |
| B50+40Mn+D+PG | 477                 | 400  | 364  | 333  |
| B50+60Mn+D+PG | 475                 | 397  | 360  | 329  |



Şekil 5.17. Hyme için hazırlanan yakıt türlerinin ÖYT emisyonlarının değişimi;

(a) Biyodizel içerikli numuneler, (b) Katkı maddeli numuneler

1500 dev/dak.'lık sabit hızda, %20, %40, %60 ve %80 değişken yük şartlarında çalıştırılarak ÖYT ölçülmüştür. Hyme'den hazırlanan B20, B35, B50, B75 ve B100 yakıtlarının motor performans testlerinden ölçülen ÖYT değerleri, dizel yakıtın değerleriyle karşılaştırılmıştır. Ölçülen ÖYT değerleri Tablo 5.17'de sunulmuştur. Biyodizel yakıtları, dizel yakıtının ÖYT değerleriyle kıyaslandığında; B20 yakıtında % 9.1, B35 yakıtında % 13.3, B50 yakıtında % 20, B75 yakıtında % 25.7 ve B100 yakıtında % 32 oranında bir artış tespit edilmiştir.

Şekil 5.17(a)'da görüldüğü gibi Tüm yakıt türleri arasında en düşük özgül yakıt tüketiminin dizel yakıtı kullanıldığında, en yüksek özgül yakıt tüketiminin de B100 kullanıldığında elde edilmiştir. Test yakıtlarının ÖYT değerleri, dizel yakıtı içerisindeki biyodizel miktarının artmasıyla orantılı bir şekilde artmaktadır. Biyodizel yakıtının; ısı değeri düşük, viskozite ve yoğunluk değerlerinin yüksek olması, ÖYT değerlerinin yüksek değerde çıkmasına sebep olduğu düşünülmektedir. Şekil 5.17(a)'da görüldüğü gibi, aynı yük şartlarında test edilen dizel ve biyodizel yakıtları aynı gücü üretmelerine rağmen biyodizel yakıtının ÖYT değeri dizel yakıtına kıyasla daha yüksektir. Belirtilen bu durum üç nedene bağlanmıştır. Birinci neden, formüsel olarak da hesaplanabileceği üzere, birbirleri arasındaki yoğunluk farkıdır. Çünkü enjeksiyon pompası yakıtları hacimsel olarak ölçerek silindirlere göndermektedir. Biyodizelin yoğunluğunun dizel yakıtına göre yüksek olmasından dolayı kütleli yakıt tüketimi, biyodizel yakıtlarında yüksek değerde çıkmaktadır. Diğer bir deyişle, yoğunluğu yüksek olan yakıt numunesinin silindirlere gönderilen gram cinsinden değeri fazladır. Yoğunluğu yüksek değerde olan yakıt numunelerinde ÖYT değerlerinin yüksek çıkması kaçınılmaz bir sonuçtur. İkinci neden ise; test yakıtları arasındaki viskozite

farklılığıdır. Yüksek viskoziteye sahip yakıtlar aynı enjektör basıncıyla ve aynı enjektör memesinin delik çapından püskürtüldüğünde daha iri taneli olarak yanma odasına giriş yapmaktadır. Bu durumda yakıt molekülleri, sıkıştırılmış hava ile iyi bir karışım gerçekleştiremeyecektir. Sonuç olarak, yakıtın buharlaşma ve yanma verimi olumsuz etkilenecektir. Bu durum harcanan yakıt miktarını arttıracığından, ÖYT değerlerini de o oranda yükselecektir [24,59]. ÖYT'yi etkileyen faktörlerden bir diğeri ise yakıtın ısıl değeridir. Her yakıt numunesi için aynı yük şartlarında test yapıldığında, yanma reaksiyonunun sonunda aynı ısıl enerji elde edilmesi gerekir. Eşit ısı enerjisi sağlayabilmek için, dizel yakıtına kıyasla biyodizel yakıtından kütsel olarak daha fazla yanma odasına alınması gerekir. Ancak bu şartlarda yakıtlar arası enerji eşdeğerliği sağlanmış olabilir. Bu durum ise, biyodizel yakıtlarında daha fazla yakıt tüketimine sebep olmaktadır. Sonuç olarak, püskürtülen yakıtın; yoğunluğu, viskozitesi ve ısıl değeri ÖYT doğrudan etkileyen unsurlardır [12,56,60,61].

B50 yakıtının ÖYT değerleri de, katkı ilaveli yakıtlarının ÖYT değerleriyle karşılaştırılmıştır. Test yakıtlarının ÖYT değerleri Tablo 5.17'de sunulmuştur. Katkı ilaveli yakıtlar, B50 yakıtının çalışma değerleriyle kıyaslandığında; B50+20Mn $\mu$ mol/lit+PG yakıtında %1, B50+40Mn $\mu$ mol/lit+PG yakıtında %1.65, B50+60Mn $\mu$ mol/lit+PG yakıtında %2.5 oranında bir azalma tespit edilmiştir.

Katkı maddelerin, ilave edildikleri yakıtların ÖYT değerlerinin azalmasına katkı sağladığı Şekil 5.17(b)'den görülmektedir. Katkı maddelerinin yakıt numunelerinde; setan sayısı, viskozite, yoğunluk ve parlama noktası gibi özellikleri iyileştirmesinin ve ayrıca yanma reaksiyonunda katalizör olarak görev yapmasının, neticesinde ÖYT değerlerinin azaldığı düşünülmektedir. Ayrıca, B50 yakıtına ilave edilen Mn bazlı katkı maddesi miktarlarının artışına bağlı olarak ÖYT değerinin daha da azaldığı Şekil 5.17(b)'den görülmektedir. Metal bazlı katkı maddesinin yakıtı ilave edilmesinin; setan sayısı, viskozite ve parlama noktası gibi özelliklere olumlu yönde katkı sağladığı belirtilmiştir [24-27]. Fakat metal bazlı katkı maddelerinin yakıtı ilave edilme oranının bir optimum değerinin olduğu, bu değerın üzerine çıkıldığında ise, setan sayısı, yoğunluk, viskozite ve parlama noktası gibi özelliklerinin olumsuz bir şekilde etkilendiğı de ayrıca belirtilmiştir [27]. ÜÇYME'den hazırlanan B50 yakıtına, 20,40 ve 60  $\mu$ mol/lit ölçeğinde Mn dozlaması yapılmıştır. Belirtilen bu ölçekler arasında, en iyi performansın 40  $\mu$ mol/lit ölçeğindeki Mn kullanımında gerçekleştiğı Şekil 5.17(b)'den görülmektedir. Her ne kadar biyodizel yakıtlarının karbon, hidrojen ve oksijen oranları birbirlerine benzer değerlerde olsa da, Tablo 3.1'deki yağ asit kompozisyonu değerlerinden görüldüğü gibi kimyasal bağ yapıları birbirlerinden farklıdır. Bu

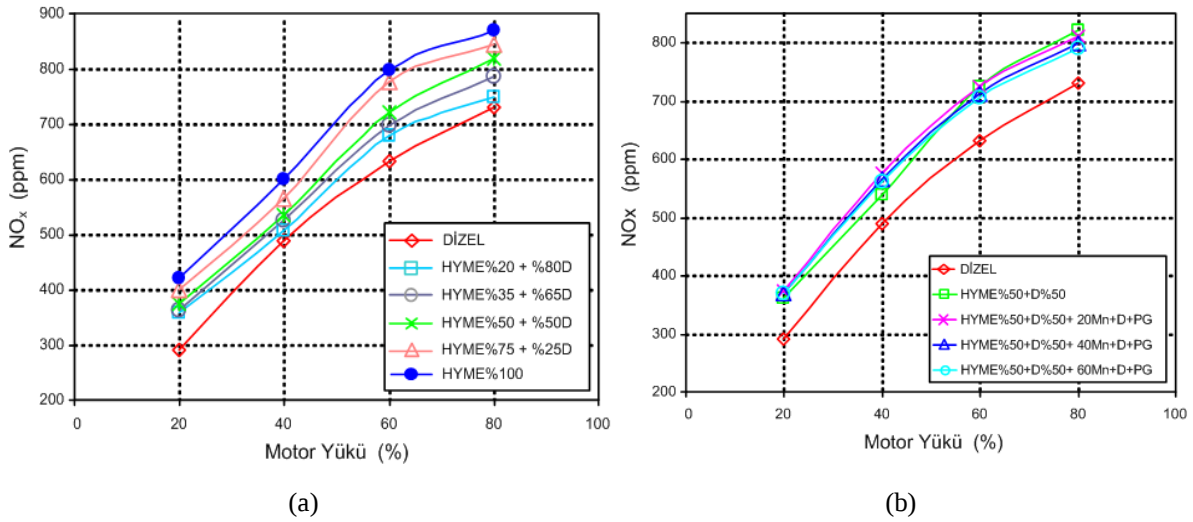
sebeple, Mn bazlı katkı maddesinin en uygun dozlama miktarının değişken değerlerde olması beklenen bir durumdur. Yapılan motor testleri neticesinde, Mn bazlı katkı maddesinin yakıtta ilave edilme oranındaki optimum değer 40 µmol/lt olduğu Şekil 5.17(b)'den görülmektedir.

### 5.3.2. HYME İçerikli Yakıt Numunelerinin NO<sub>x</sub> Emisyonları Analizi

NO<sub>x</sub>'ler genellikle, motorun yüksek sıcaklıklardaki çalışma şartlarında oluşmaktadır. NO<sub>x</sub> terimi NO ve NO<sub>2</sub>'nin atmosferdeki toplam yoğunluğunun ifadesidir. Dizel motorlar yanma reaksiyonunu oluştururken diğer motor tiplerine göre daha fazla hava kullanmaktadır. Kullanılan havanın içeriğindeki oksijen, aşırı sıcak çalışma şartlarında ve yanma için yeterli zaman oluştuğunda, azot ile reaksiyona girer. Bu reaksiyon sonucunda NO<sub>x</sub> emisyonları oluşur. NO<sub>x</sub> genellikle, kontrolsüz yanma aşamasında meydana gelmektedir. Biyodizelin oksijen içeriği nedeniyle dizel yakıtla kıyasla daha yüksek NO<sub>x</sub> salınımına sebebiyet vereceği belirtilmiştir. Biyodizel ile çalışan motorlarda silindir içi basıncın ve sıcaklık değerlerinin yüksek oluşu, NO<sub>x</sub> emisyonu oluşmasına neden olarak gösterilmiştir [62-64]. NO<sub>x</sub> oluşumu büyük oranda silindir içi sıcaklığa, basınca, tutuşma gecikmesi ve yanma süresine bağlıdır [65-67].

**Tablo 5.18.** HYME yakıt türlerinin değişken yükteki NO<sub>x</sub> değerleri

| Yakıt türü    | NO <sub>x</sub> emisyonu (ppm) |      |      |      |
|---------------|--------------------------------|------|------|------|
|               | % 20                           | % 40 | % 60 | % 80 |
| DY            | 290                            | 488  | 632  | 731  |
| B20           | 357                            | 508  | 678  | 749  |
| B35           | 362                            | 525  | 698  | 787  |
| B50           | 374                            | 536  | 721  | 819  |
| B75           | 401                            | 566  | 776  | 845  |
| B100          | 422                            | 600  | 798  | 869  |
| B50+20Mn+D+PG | 373                            | 576  | 724  | 811  |
| B50+40Mn+D+PG | 370                            | 566  | 711  | 799  |
| B50+60Mn+D+PG | 369                            | 561  | 705  | 790  |



**Şekil 5.18.** HYPE için hazırlanan yakıt türlerinin NO<sub>x</sub> emisyonlarının değişimi;  
(a) Biyodizel içerikli numuneler, (b) Katkı maddeli numuneler

HYPE'den hazırlanan B20, B35, B50, B75 ve B100 yakıtlarının NO<sub>x</sub> emisyonu değerleri, dizel yakıtın değerleriyle ile karşılaştırılmıştır. Ölçülen NO<sub>x</sub> emisyonu değerleri Tablo 5.18'de sunulmuştur. Biyodizel yakıtları, dizel yakıtının NO<sub>x</sub> emisyonu değerleriyle kıyaslandığında; B20 yakıtında % 7.2, B35 yakıtında % 11, B50 yakıtında % 14.5, B75 yakıtında % 21 ve B100 yakıtında % 25.7 oranında bir artış tespit edilmiştir.

Şekil 5.18(a)'da görüldüğü gibi, düşük yüklerde silindir içi sıcaklığının düşük olması, bütün test yakıtları için NO<sub>x</sub> emisyonunun düşük çıkmasına neden olmuştur. Motordaki yükün artışı ile NO<sub>x</sub> emisyonlarında da aynı paralelde bir artış gözlemlenmiştir. Yükün artmasıyla beraber NO<sub>x</sub> emisyon değerlerindeki bu artış; silindir içi sıcaklığın artması ve daha fazla yakıt tüketimi gibi sebeplere bağlanmıştır. Şekil 5.24(a)'daki Egzoz çıkış sıcaklık değerleri ve Şekil 5.17(a)'daki ÖYT değerleri de bu durumu desteklemektedir. Silindir içi sıcaklığın artması, silindir içi hava hareketliliğini oluşturarak NO<sub>x</sub> emisyonlarının oluşumuna zemin hazırlamaktadır [64]. Fakat dizel yakıtı içerisindeki biyodizel oranının artmasıyla sıcaklık değerleri daha da yükselmekte, bu yükselmenin neticesinde ise; basınç, hava hareketliliği gibi oluşumların daha hızlı gerçekleştiği düşünülmektedir. Aynı yük şartlarında NO<sub>x</sub> emisyonu değerleri arasındaki farklılığın bir diğer nedeni ise, yakıt numunelerin ısı değerleri arasındaki farklılıktan kaynaklandığı düşünülmektedir. Biyodizel yakıtlarının, aynı enerjiyi elde edebilmeleri için kütsel olarak daha fazla kullanılması gerekir. Gram cinsinden daha fazla yakıtın kullanılması, NO<sub>x</sub> emisyonlarının artmasına sebep olarak gösterilebilir.

B50 yakıtının NO<sub>x</sub> emisyonu değerleri de, B50+20Mn+PG, B50+40Mn+PG ve B50+60Mn+PG yakıtlarının NO<sub>x</sub> emisyonu değerleriyle karşılaştırılmıştır. Test yakıtlarının

NO<sub>x</sub> değerleri Tablo 5.18’de sunulmuştur. Katkı ilaveli yakıtlar, B50 yakıtının NO<sub>x</sub> emisyonu değerleriyle kıyaslandığında; B50+20Mn+PG yakıtında % 1.5 artış, B50+40Mn+PG yakıtında % 0.1, B50+60Mn+PG yakıtında % 0.9 oranında bir azalma tespit edilmiştir.

Katkı maddelerinin yapısında oksijen bulunması ve egzoz çıkış sıcaklık değerlerinin yüksek olması sebebiyle, NO<sub>x</sub> emisyonlarının daha yüksek olması beklenmektedir. Ancak beklenenin tersine NO<sub>x</sub> emisyonu değerlerinde bir düşüş olduğu Şekil 5.18(b)’den görülmektedir. Yakıt numunelerine katkı maddelerinin ilave edilmesiyle, setan sayısının artması, ÖYT değerlerinin ve parlama noktasının düşmesi gibi sebeplerin neticesinde NO<sub>x</sub> emisyonlarının azalttığı düşünülmektedir. Nitekim hayvansal iç yağı metil esteri ve karışımlarının kullanıldığı bir çalışmada, özgül yakıt tüketimi ve egzoz çıkış sıcaklığı değerlerinin dizel yakıtına göre yüksek olmasına rağmen daha düşük NO<sub>x</sub> emisyonları elde edilmiştir. Yakıt numunelerinin dizel yakıtına göre yüksek setan sayısına ve daha düşük parlama noktasına sahip olması ile açıklanmıştır. Setan sayısının artması ile NO<sub>x</sub> emisyonlarının azaldığı da ayrıca vurgulanmıştır [68]. Katkı maddeleri, tutuşma gecikmesini önleyerek azot ile oksijenin reaksiyona gireceği süreyi kısalttığı düşünülmektedir. Katkılı numunelerdeki yanma sürenin kısalması, NO<sub>x</sub> oluşumunun azalmasına sebep olarak gösterilebilir.

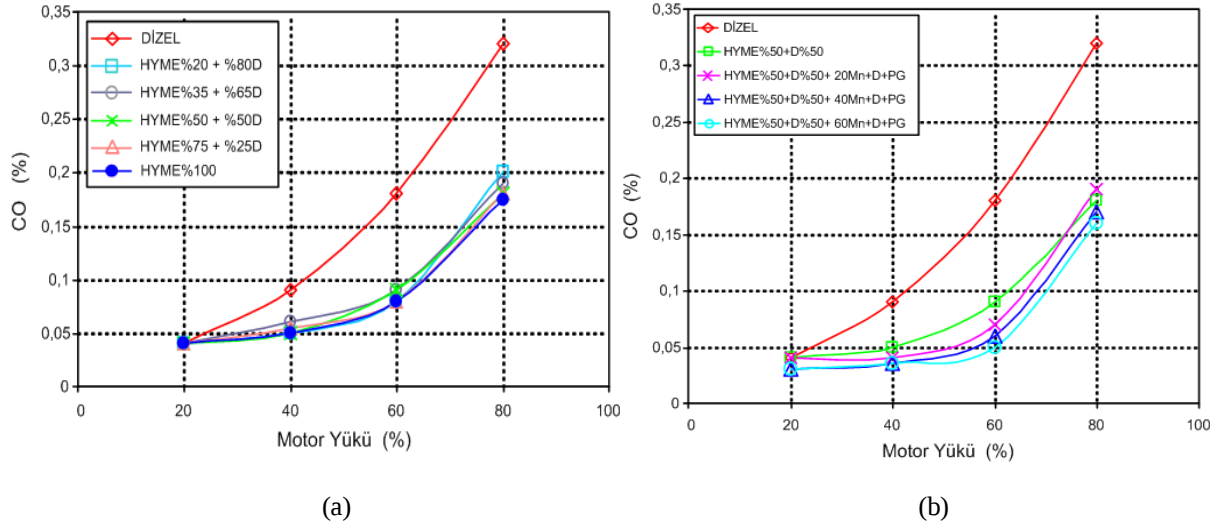
Biyodizel yakıtlarının viskozitelerinin ve parlama noktalarının yüksek olması, tutuşma gecikmesine sebep olmakta, neticesinde azot ile oksijenin reaksiyona girebileceği zaman diliminin oluşturmaktadır [63].

### **5.3.3. HYME İçerikli Yakıt Numunelerinin Karbon Monoksit (CO) Emisyonları Analizi**

CO emisyonlarının oluşumu dizel motorlarda birçok nedene bağlanabilir. Gaz sıcaklığının düşük olması, yeterli oksijenin bulunmaması ve CO<sub>2</sub>’ye dönüşüm için yeterli zamanın kalmamasından dolayı yanmanın tamamlanmamış olması CO miktarını artırır[69]. Biyodizel yakıtının oksijen içermesi, düşük karbon oranı ve yüksek setan sayısı CO emisyonlarındaki azalmanın temel sebepleridir [45,70-76].

**Tablo 5.19.** HYME için hazırlanan yakıt türlerinin değişken yükteki CO değerleri

| Yakıt Türü    | CO Emisyonu (%) |       |      |       |
|---------------|-----------------|-------|------|-------|
|               | % 20            | % 40  | % 60 | % 80  |
| DY            | 0,04            | 0,09  | 0,18 | 0,32  |
| B20           | 0,04            | 0,05  | 0,08 | 0,2   |
| B35           | 0,04            | 0,06  | 0,09 | 0,19  |
| B50           | 0,04            | 0,05  | 0,09 | 0,18  |
| B75           | 0,04            | 0,055 | 0,08 | 0,18  |
| B100          | 0,04            | 0,05  | 0,08 | 0,175 |
| B50+20Mn+D+PG | 0,04            | 0,04  | 0,07 | 0,19  |
| B50+40Mn+D+PG | 0,03            | 0,035 | 0,06 | 0,17  |
| B50+60Mn+D+PG | 0,03            | 0,035 | 0,05 | 0,16  |



**Şekil 5.19.** HYME için hazırlanan yakıt türlerinin CO emisyonlarının değişimi;

(a) Biyodizel içerikli numuneler, (b) Katkı maddeli numuneler

HYME'den hazırlanan B20, B35, B50, B75 ve B100 yakıtlarının ölçülen CO emisyonu değerleri, dizel yakıtın değerleriyle karşılaştırılmıştır. Ölçülen CO emisyon değerleri Tablo 5.19'da sunulmuştur. Biyodizel yakıtları, dizel yakıtının CO emisyonu değerleriyle kıyaslandığında; B20 yakıtında % 41.5, B35 yakıtında % 39.7, B50 yakıtında % 42.8, B75 yakıtında % 44 ve B100 yakıtında % 45.1 oranında bir azalma tespit edilmiştir.

Tüm test yakıtları için motordaki yük arttıkça CO emisyonlarının da aynı paralelde arttığı Şekil 5.19(a)'dan görülmektedir. Yükün artmasıyla beraber CO emisyonlarındaki bu artış, kütsel olarak daha fazla yakıt kullanılmasına bağlanmıştır. Yükün artmasıyla beraber gram cinsinden daha fazla yakıt kullanılması CO emisyonlarının artışına sebep olarak

gösterilebilir. Biyodizel yakıtlarının CO emisyonlarının, dizel yakıtına göre daha düşük değerlerde olduğu Şekil 5.19(a)'da görülmektedir. Biyodizel yakıtının setan sayısının yüksek olması ve kimyasal bağ yapısında oksijen bulundurması biyodizel yakıtlarının CO emisyonu değerlerindeki azalmaya sebep olduğu düşünülmektedir. Test yakıtlarının CO emisyon değerleri %20 yükte benzer değerde iken, %40, %60, %80 yük şartlarında, yakıtların CO emisyon değerleri arasında belirgin farklılıklar olduğu Şekil 5.19(a)'dan görülmektedir. Dizel yakıtı içerisindeki biyodizel oranının arttırılmasıyla, setan sayısı ve oksijen içeriği gibi değerlerin arttığı ve bu durumun ise test yakıtları arasındaki CO emisyonlarının farklı değerlerde oluşmasına sebep olduğu düşünülmektedir. Yakıtların yanma performansını etkileyecek özellikleri ne kadar iyi olursa, CO emisyon değerlerinin de o nispette düşük olacağı düşünülmektedir.

B50 yakıtının CO emisyonu değerleri de, B50+20Mn+PG, B50+40Mn+PG ve B50+60Mn+PG yakıtlarının CO emisyonu değerleriyle karşılaştırılmıştır. Test yakıtlarının CO değerleri Tablo 5.19'da sunulmuştur. Katkı ilaveli yakıtlar, B50 yakıtının CO emisyonu değerleriyle kıyaslandığında; B50+20Mn+PG yakıtında % 5.2, B50+40Mn+PG yakıtında % 18.8, B50+60Mn+PG yakıtında % 24 oranında bir azalma tespit edilmiştir.

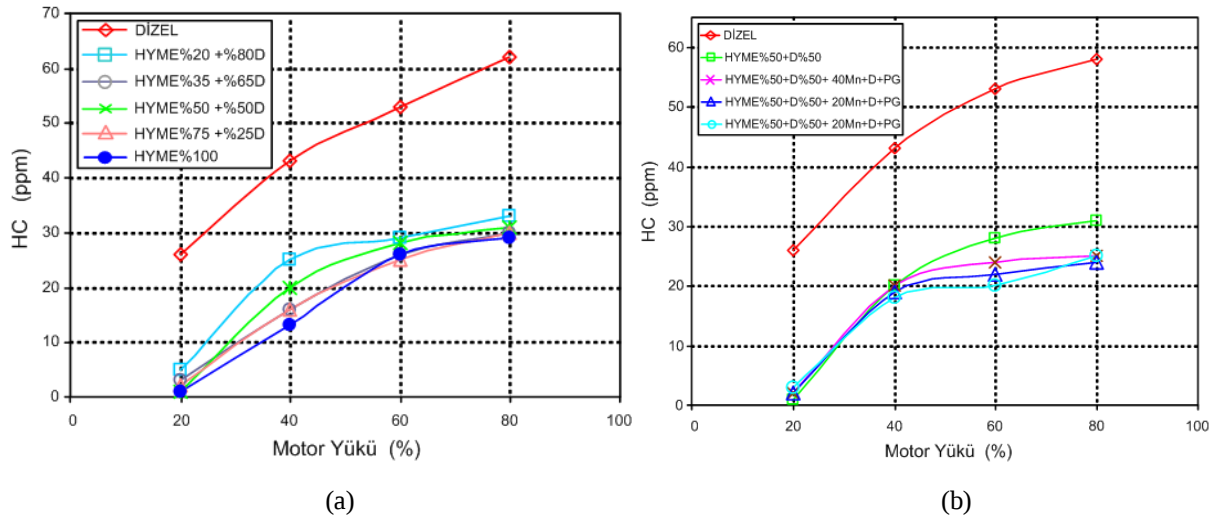
Katkı ilaveli yakıtların CO emisyonu değerleri B50 yakıtına göre daha düşük olduğu Şekil 5.19(b)'de görülmektedir. Katkı maddeleri, ilave edildikleri yakıtın; setan sayısı, parlama noktası, viskozite ve yoğunluk gibi özelliklerini iyileştirmesiyle, B50 yakıtına göre daha iyi bir yanma performansı sağladığı düşünülmektedir [45,70-76]. Şekil 5.19(b)'de görüldüğü gibi, yakıtta Mn ilavesi miktarının artırılmasıyla, CO emisyon değerleri düşmüştür. Mn bazlı katkı maddesinin, yakıtların yanma performansını etkileyecek özelliklerini iyileştirmektedir [70]. Yanma performansının iyileşmesi, CO emisyonunun CO<sub>2</sub>'ye dönüşümü için zaman kazandırdığı düşünülmektedir. Katkı ilaveli numunelerin CO<sub>2</sub> emisyonlarının B50 yakıtına göre yüksek çıkması, belirtilen bu durumu desteklemektedir.

#### **5.3.4. HYME İçerikli Yakıt Numunelerinin Hidrokarbon (HC) Emisyonları Analizi**

HC emisyonlarının oluşmasında iki önemli unsur ön plana çıkmaktadır. Birincisi, önceki çevrimden kalan yanmış gazlardır [77]. Motordaki iş sonunda, enjektör ucuna yakın kör noktalarda ve enjektör deliğinde bir miktar da olsa, bir sonraki çevrime yanmış gazlar kalır. Yanma odasında kalan bu gazlar bir sonraki çevrimde sıkıştırılan hava ile karışır. Bu durum yeni hava-yakıt karışımının oksijen oranını düşürerek HC emisyonlarının oluşmasına sebebiyet vermektedir [78].

**Tablo 5.20.** HYME için hazırlanan yakıt türlerinin değişken yükteki HC değerleri

| Yakıt türü    | HC emisyonu (ppm) |      |      |      |
|---------------|-------------------|------|------|------|
|               | % 20              | % 40 | % 60 | % 80 |
| DY            | 26                | 43   | 53   | 62   |
| B20           | 5                 | 25   | 29   | 33   |
| B35           | 3                 | 16   | 26   | 30   |
| B50           | 1                 | 20   | 28   | 31   |
| B75           | 2                 | 16   | 25   | 30   |
| B100          | 1                 | 13   | 26   | 29   |
| B50+20Mn+D+PG | 2                 | 20   | 24   | 25   |
| B50+40Mn+D+PG | 2                 | 19   | 22   | 24   |
| B50+60Mn+D+PG | 3                 | 18   | 20   | 25   |



**Şekil 5.20.** HYME için hazırlanan yakıt türlerinin HC emisyonlarının değişimi;

(a) Biyodizel içerikli numuneler, (b) Katkı maddeli numuneler

HYME'den hazırlanan B20, B35, B50, B75 ve B100 yakıtlarının ölçülen HC emisyonu değerleri, dizel yakıtın değerleriyle karşılaştırılmıştır. Ölçülen HC emisyonu değerleri Tablo 5.20'de sunulmuştur. Biyodizel yakıtları, dizel yakıtının HC değerleriyle kıyaslandığında; B20 yakıtında % 50, B35 yakıtında % 59.3, B50 yakıtında % 55.4, B75 yakıtında % 60.4 ve B100 yakıtında % 62.6 oranında bir azalma tespit edilmiştir.

Motorda biyodizel yakıtının kullanılmasıyla HC emisyonlarında azalma olduğu Şekil 5.20(a)'dan görülmektedir. Bu azalmanın, biyodizel yakıtlarının yapısındaki oksijenden kaynaklandığı düşünülmektedir. Biyodizel yakıtının oksijen içeriğinin fazla olması yanma reaksiyonuna ek katkı sağlayarak, HC emisyonlarının azalmasına neden olduğu

düşünülmektedir. Test edilen yakıt numunelerinin HC emisyon değerlerinde belirgin farklılığın olduğu Şekil 5.20(a)'dan görülmektedir. Her yakıt numunesinin kimyasal içeriğinde değişken oranda oksijen bulunması ve dizel yakıt içerisindeki biyodizel oranının artmasıyla setan sayısı değerinin de aynı paralelde artış göstermesi bu belirgin farklılığın sebebi olarak gösterilebilir. Motordaki yükün artmasıyla beraber tüm yakıtların CO emisyon değerlerinde artış gözlenmiştir. Bu artışın nedeni; yükün artmasına paralel olarak kütleli yakıt sarfiyatının artması şeklinde açıklanabilir.

Literatürde yapılan çalışmalarda; dizel yakıtının, yanma odasında hava ile istenen düzeyde bir karışım oluşturmaması neticesinde yüksek CO ve HC emisyonlarının oluştuğu belirtilmiştir. Biyodizel karışimli yakıtların yapısında oksijen bulunması sebebiyle; CO, HC ve duman emisyonlarında azalma tespit edilmiştir. Çünkü yakıtın oksijen içeriği yanma sırasında ek oksijen sağlayarak tam yanmayı geliştirmekte ve bu durumun HC emisyonlarının azalmasına katkı sağladığı belirtilmiştir. Bununla beraber setan sayısı, kaynama noktası, kükürt ve aromatik bileşen içeriği gibi özelliklerin de CO, HC ve duman emisyonlarındaki değişim üzerinde etkili olduğunu ifade edilmiştir [70,71,77,78].

B50 yakıtının HC emisyonu değerleri de, B50+20Mn+PG, B50+40Mn+PG ve B50+60Mn+PG yakıtlarının HC emisyonu değerleriyle karşılaştırılmıştır. Test yakıtlarının HC emisyonu değerleri Tablo 5.20'de sunulmuştur. Katkı ilaveli yakıtlar, B50 yakıtının HC emisyonu değerleriyle kıyaslandığında; B50+20Mn+PG yakıtında % 11, B50+40Mn+PG yakıtında % 16.4, B50+60Mn+PG yakıtında % 17.5 oranında bir azalma tespit edilmiştir.

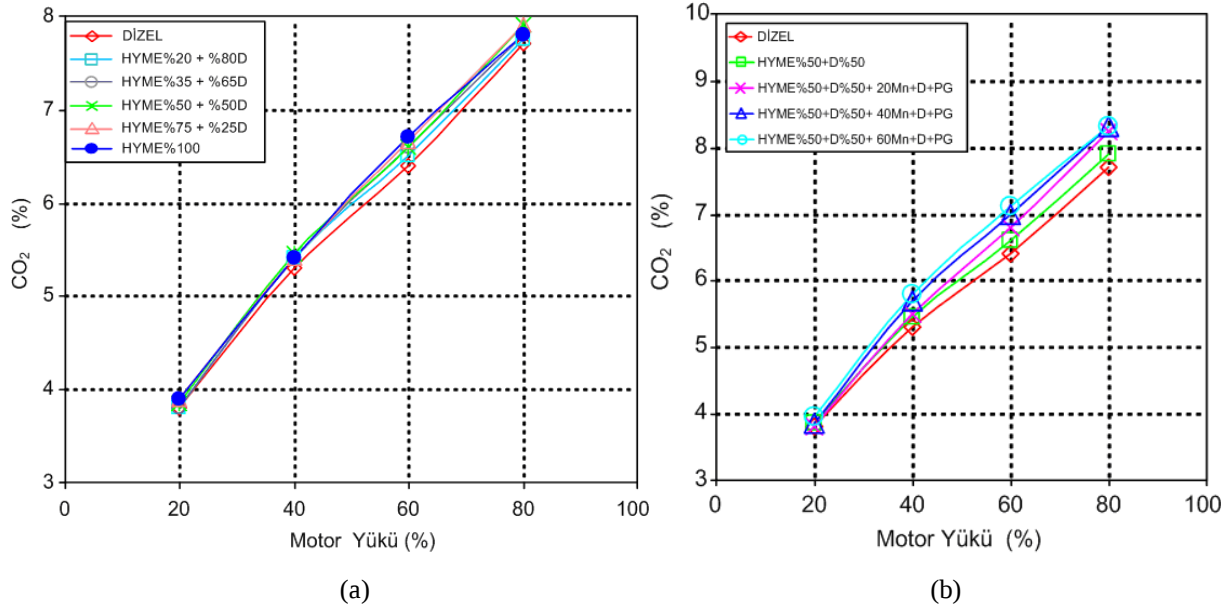
Test yakıtlarına katkı maddelerinin ilave edilmesiyle HC emisyon değerleri B50 yakıtına kıyasla azalma olduğu Şekil 5.20(b)'de görülmüştür. Katkı maddeleri yakıtın setan sayısını ve oksijen içeriğini arttırdığı ve neticesinde de iyi bir yanma karakteristiğinin oluşmasına katkı sağladığı düşünülmektedir. Propilen glikolün ve dodekanolün oksijen bakımından zengin bir yapıya sahip olması, Mn bazlı katkı maddesinin ise setan sayısı üzerinde olumlu bir katkı sağladığı düşünülmektedir.

#### **5.3.5. HYPE İçerikli Yakıt Numunelerinin Karbondioksit (CO<sub>2</sub>) Emisyonları Analizi**

CO<sub>2</sub> emisyonları doğrudan yanma ile ilgilidir. Dizel bir motor düşük devirde çalışıyorsa, yanma performansı da düşüktür. Çünkü düşük devirlerde silindir içi sıcaklık değeri optimum şartlarda olmadığı için kötü bir yanma reaksiyonu gerçekleşmektedir [78].

**Tablo 5.21.** HYME için hazırlanan yakıt türlerinin değişken yükteki CO<sub>2</sub> değerleri

| Yakıt türü    | CO <sub>2</sub> emisyonu (%) |      |      |      |
|---------------|------------------------------|------|------|------|
|               | % 20                         | % 40 | % 60 | % 80 |
| DY            | 3,8                          | 5,3  | 6,4  | 7,7  |
| B20           | 3,8                          | 5,4  | 6,5  | 7,75 |
| B35           | 3,8                          | 5,4  | 6,6  | 7,8  |
| B50           | 3,85                         | 5,45 | 6,6  | 7,9  |
| B75           | 3,9                          | 5,4  | 6,65 | 7,9  |
| B100          | 3,9                          | 5,4  | 6,7  | 7,8  |
| B50+20Mn+D+PG | 3,8                          | 5,5  | 6,8  | 8,25 |
| B50+40Mn+D+PG | 3,85                         | 5,7  | 7    | 8,3  |
| B50+60Mn+D+PG | 3,95                         | 5,8  | 7,1  | 8,3  |



**Şekil 5.21.** HYME için hazırlanan yakıt türlerinin CO<sub>2</sub> emisyonlarının değişimi;

(a) Biyodizel içerikli numuneler, (b) Katkı maddeli numuneler

HYME'den hazırlanan B20, B35, B50, B75 ve B100 yakıtlarının ölçülen CO<sub>2</sub> değerleri, dizel yakıtın değerleriyle karşılaştırılmıştır. Ölçülen CO<sub>2</sub> emisyonu değerleri Tablo 5.21'de sunulmuştur. Biyodizel yakıtları, dizel yakıtının CO<sub>2</sub> değerleriyle kıyaslandığında; B20 yakıtında % 1.1, B35 yakıtında % 1.9, B50 yakıtında % 2.6, B75 yakıtında % 2.8 ve B100 yakıtında % 2.6 oranında bir artış tespit edilmiştir.

Şekil 5.21(a)'dan, test yakıtlarının hepsinde motordaki yükün artmasıyla beraber CO<sub>2</sub> emisyon değerlerinde artış olduğu görülmektedir. Motordaki yükün artmasına paralel bir artış

gösteren ÖYT ve egzoz çıkış sıcaklığı değerlerinin, CO<sub>2</sub> emisyonlarındaki artışa sebebiyet verdiği düşünülmektedir. Tablo 5.21'deki veriler incelendiğinde, dizel yakıtının içerisindeki biyodizel oranının artmasıyla CO<sub>2</sub> emisyon değerleri artmıştır. Dizel yakıtına kıyasla biyodizelin yapısında daha fazla bulunan oksijenin, silindir içindeki yanma esnasında karbon atomu ile reaksiyona girerek CO<sub>2</sub> emisyonlarını oluşturduğu düşünülmektedir. Ayrıca Şekil 5.22(a)'da görüldüğü gibi yükün artmasıyla O<sub>2</sub> emisyonu değerlerinin düşmesi de bu durumu desteklemektedir.

B50 yakıtının CO<sub>2</sub> değerleri de, B50+20Mn+PG, B50+40Mn+PG ve B50+60Mn+PG yakıtlarının CO<sub>2</sub> değerleriyle karşılaştırılmıştır. Test yakıtlarının CO<sub>2</sub> emisyonu değerleri Tablo 5.21'de sunulmuştur. Katkı ilaveli yakıtlar, B50 yakıtının CO<sub>2</sub> değerleriyle kıyaslandığında; B50+20Mn+PG yakıtında % 2.2, B50+40Mn+PG yakıtında % 4.3, B50+60Mn+PG yakıtında % 4.95 oranında bir artış tespit edilmiştir.

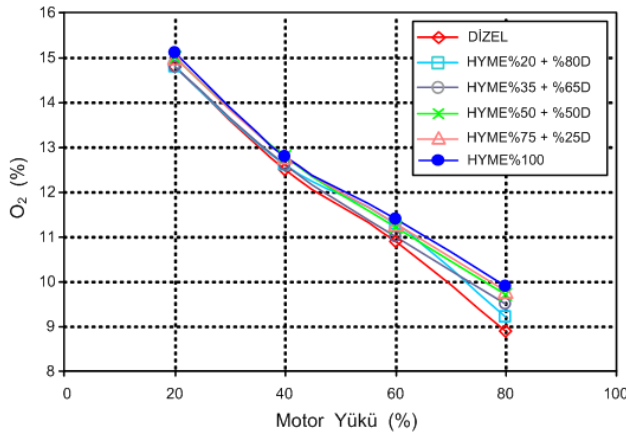
Şekil 5.21(b)'den görüldüğü gibi, katkı maddeleri, ilave edildikleri yakıtlarında CO<sub>2</sub> emisyon değerlerinin artışına sebep olmuştur. Katkı maddeleri, ilave edildikleri yakıtların oksijen içeriğini arttırmaktadır. Yanma reaksiyonu esnasında ortamda oksijen miktarının fazla olması, daha fazla karbon atomu oksitlenmesine ve bunun neticesinde de CO<sub>2</sub> emisyonlarının artmasına neden olduğu düşünülmektedir. Ayrıca katkı maddeleri, numunelerin setan sayısı, viskozite, yoğunluk ve parlama noktası gibi özellikleri iyileştirerek yanma verimine katkı sağlamaktadır [45,70-76]. İyi bir yanma reaksiyonunun oluşması, silindir içi sıcaklığı arttırırken beraberinde de CO<sub>2</sub> emisyon değerlerinin yükselmesine sebep olduğu düşünülmektedir.

### **5.3.6. HYME Yakıt Numunelerinin Oksijen (O<sub>2</sub>) Emisyonları Analizi**

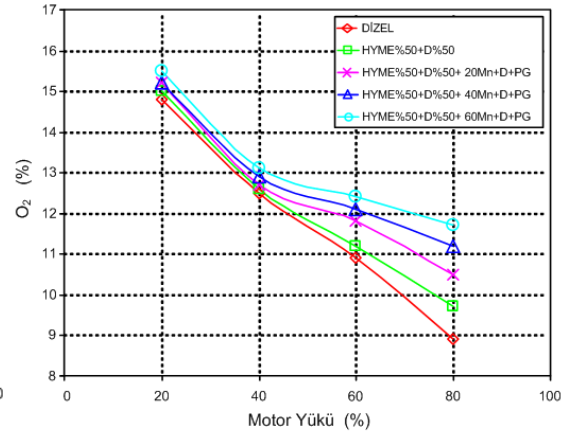
İçten yanmalı motorlarda enerji, hava-yakıt karışımının yanması sonucu elde edilmektedir. Hava ve yakıtın içerisinde bulunan oksijen motorda yanma reaksiyonu sonucunda oluşan bir emisyon ürünüdür.

**Tablo 5.22.** HYME yakıt türlerinin değişken yükteki O<sub>2</sub> değerleri

| Yakıt türü    | O <sub>2</sub> emisyonu (ppm) |      |      |      |
|---------------|-------------------------------|------|------|------|
|               | % 20                          | % 40 | % 60 | % 80 |
| DY            | 14,8                          | 12,5 | 10,9 | 8,9  |
| B20           | 14,8                          | 12,6 | 11,3 | 9,2  |
| B35           | 14,8                          | 12,6 | 11   | 9,5  |
| B50           | 15                            | 12,8 | 11,2 | 9,7  |
| B75           | 15                            | 12,8 | 11,3 | 9,8  |
| B100          | 15,1                          | 12,8 | 11,4 | 9,9  |
| B50+20Mn+D+PG | 15,2                          | 12,7 | 11,8 | 10,5 |
| B50+40Mn+D+PG | 15,2                          | 12,9 | 12,1 | 11,2 |
| B50+60Mn+D+PG | 15,5                          | 13,1 | 12,4 | 11,7 |



(a)



(b)

**Şekil 5.22.** HYME için hazırlanan yakıt türlerinin O<sub>2</sub> emisyonlarının değişimi;

(a) Biyodizel içerikli numuneler, (b) Katkı maddeli numuneler

HYME'den hazırlanan B20, B35, B50, B75 ve B100 yakıtlarının ölçülen O<sub>2</sub> değerleri, dizel yakıtın değerleriyle karşılaştırılmıştır. Ölçülen O<sub>2</sub> emisyonu değerleri Tablo 5.22'de sunulmuştur. Biyodizel yakıtları, dizel yakıtının O<sub>2</sub> değerleriyle kıyaslandığında; B20 yakıtında % 1.75, B35 yakıtında % 1.75, B50 yakıtında % 3.45, B75 yakıtında % 3.9 ve B100 yakıtında % 4.5 oranında bir artış tespit edilmiştir.

Tüm test yakıtları için motordaki yük arttıkça O<sub>2</sub> emisyonlarında azalma olduğu Şekil 5.22(a)'dan görülmektedir. Test yakıtlarının %20 yükte yüksek olan O<sub>2</sub> emisyonu değerleri yüklemenin artmasıyla ters orantılı olarak azalmıştır. %20 yükte silindir içi sıcaklığın düşük olması nedeniyle, oksijenin karbon atomu ile reaksiyon oluşturamadığı düşünülmektedir. %20 yükte karbon oksijen oksitlenmesi gerçekleşmemesi neticesinde, egzoz gazlarındaki O<sub>2</sub>

miktarının arttığı, CO<sub>2</sub> miktarının da azaldığı Şekil 5.21(a) ve Şekil 5.22(a)'dan görülmektedir. Dizel yakıt içerisindeki biyodizel oranının artmasıyla, O<sub>2</sub> emisyonları da aynı paralelde arttığı Şekil 5.22(a)'dan görülmektedir. Biyodizelin dizel yakıtına göre daha fazla oksijen içermesi, biyodizel yakıtlarında O<sub>2</sub> emisyonlarının yüksek çıkmasına sebep olduğu düşünülmektedir. Biyodizel kullanıldığında elde edilen CO emisyonlarının daha düşük olması bu düşüncüyü ayrıca desteklemektedir.

B50 yakıtının O<sub>2</sub> değerleri de, B50+20+PG, B50+40Mn+PG ve B50+60Mn+PG yakıtlarının O<sub>2</sub> değerleriyle karşılaştırılmıştır. Test yakıtlarının O<sub>2</sub> emisyonu değerleri Tablo 5.22'de sunulmuştur. Katkı ilaveli yakıtlar, B50 yakıtının O<sub>2</sub> değerleriyle kıyaslandığında; B50+20Mn+PG yakıtında % 3.1, B50+40Mn+PG yakıtında % 5.6, B50+60Mn+PG yakıtında % 8.25 oranında bir artış tespit edilmiştir.

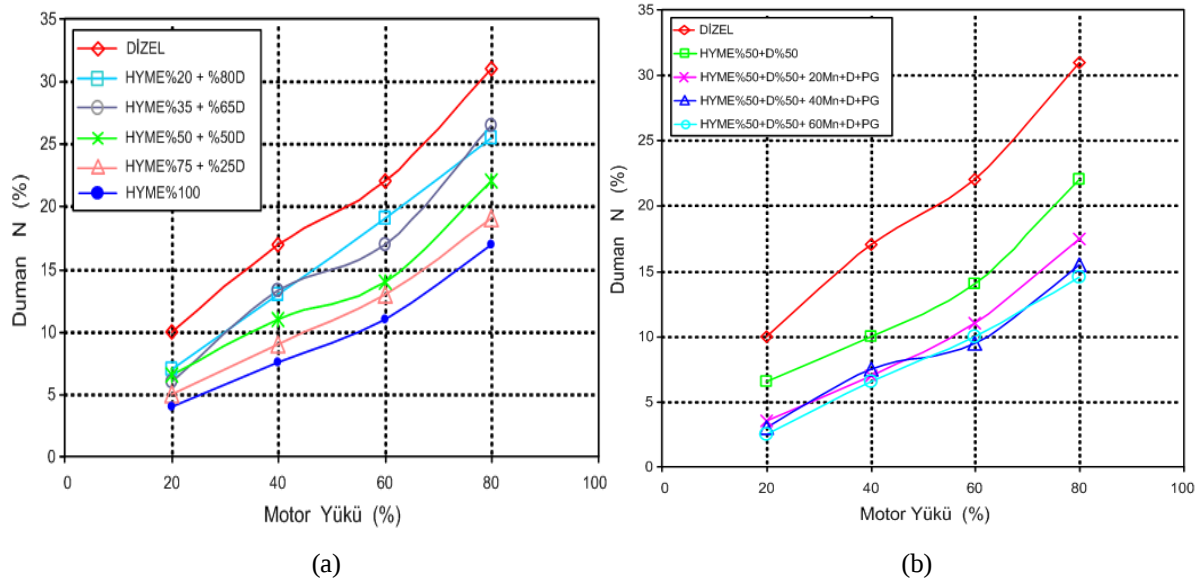
Şekil 5.22(b)'de görüldüğü gibi katkılı yakıt numunelerinde düşük yük şartlarında yüksek olan oksijen miktarı, yüklemenin artmasıyla orantılı olarak düşmüştür. Yükün artmasıyla beraber O<sub>2</sub> emisyon değerlerinin tüm test yakıtları için düşmesinin nedenini, %20 ile %80 yük değerleri arasında O<sub>2</sub> ile CO<sub>2</sub> emisyon değerlerinin ters orantılı olması şeklinde açıklanabilir. Şekil 5.21(b)'de ve Şekil 5.22(b)'de görüldüğü gibi, O<sub>2</sub> değerlerinin yüksek olduğu durumda CO<sub>2</sub> değerleri düşük, O<sub>2</sub> değerlerinin düşük olduğu durumda CO<sub>2</sub> değerleri yüksek olduğu görülmektedir. Şekil 5.22(b)'den görüldüğü gibi, katkı maddelerinin ilavesi ile O<sub>2</sub> emisyonu değerlerinde artış olmuştur. Bu artışın, gerek biyodizel yakıtındaki gerekse katkı maddelerindeki oksijen içeriğinin fazla olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Katkı maddelerinin %20 yük durumundan itibaren, O<sub>2</sub> emisyon değerlerinde farklılığa sebebiyet verdiği Şekil 5.22(b)'den görülmektedir. Her ne kadar karbon atomu oksitlemesi sonucu CO<sub>2</sub>'ye dönüşüm olsa da katkı ilaveli yakıtlardaki oksijen miktarının fazla olması bazı oksijen gazlarının karbon atomu ile bağ kuramamasına sebep olduğu düşünülmektedir. Katkılı numunelerin içeriğindeki oksijen miktarının, B50 yakıtı ile katkı ilaveli yakıtların O<sub>2</sub> emisyon değerleri arasındaki farklılığı oluşturduğu düşünülmektedir.

### **5.3.7. HYME İçerikli Yakıt Numunelerinin Duman (İs) Emisyonları Analizi**

Alev içerisindeki türbülanslı karışım alanları ve Sıcaklık is oluşumunu etkileyen önemli parametrelerdir. Bölgesel sıcaklık değişimi ve oksijen konsantrasyonu dağılımı is oluşum mekanizmasının temel fiziksel büyüklükleridir. Bununla beraber yakıtın yüksek oksijen içeriği, düşük C/H oranı ve aromatik bileşenlerin olmaması duman oluşumunda önemli bir etkiye sahiptir [76].

**Tablo 5.23.** HYME için hazırlanan yakıt türlerinin değişken yükteki duman emisyonu değerleri

| Yakıt türü    | Duman emisyonu (%) |      |      |      |
|---------------|--------------------|------|------|------|
|               | % 20               | % 40 | % 60 | % 80 |
| DY            | 10                 | 17   | 22   | 31   |
| B20           | 7                  | 13   | 19   | 25,5 |
| B35           | 6                  | 13,3 | 17   | 26,5 |
| B50           | 6,5                | 11   | 14   | 22   |
| B75           | 5                  | 9    | 13   | 19   |
| B100          | 4                  | 7,5  | 11   | 17   |
| B50+20Mn+D+PG | 3,5                | 7    | 11   | 17,5 |
| B50+40Mn+D+PG | 3                  | 7,5  | 9,5  | 15,5 |
| B50+60Mn+D+PG | 2,5                | 6,5  | 10   | 14,5 |



**Şekil 5.23.** HYME için hazırlanan yakıt türlerinin duman emisyonlarının değişimi;

(a) Biyodizel içerikli numuneler, (b) Katkı maddeli numuneler

HYME'den hazırlanan B20, B35, B50, B75 ve B100 yakıtlarının ölçülen duman emisyon değerleri, dizel yakıtın değerleriyle karşılaştırılmıştır. Ölçülen duman emisyonu değerleri Tablo 5.23'de sunulmuştur. Biyodizel yakıtları, dizel yakıtının duman emisyon değerleriyle kıyaslandığında; B20 yakıtında % 19.5, B35 yakıtında % 21.25, B50 yakıtında % 33.1, B75 yakıtında % 42.5 ve B100 yakıtında % 51 oranında bir azalma tespit edilmiştir.

Biyodizel kullanıldığında duman emisyonu değerlerinin dizel yakıtına göre düşük çıkmasının temel nedeni, biyodizelin oksijen bakımından zengin bir yapıya sahip olması olarak açıklanabilir. Ayrıca dizel yakıtına kıyasla daha düşük karbon atomu içeren biyodizel,

yapısındaki oksijenden dolayı yanma sırasında oksitlenme miktarını arttırarak, duman emisyonlarının oluşumunu azalttığı düşünülmektedir. Nitekim; dizel yakıt içerisindeki biyodizel oranının artmasıyla duman emisyonlarının azaldığı Şekil 5.23(a)'da görülmektedir.

Biyodizelin oksijen içeriğinden dolayı, duman emisyonlarında önemli bir düşüş sağlandığı belirtilmiştir [77]. Ayrıca karbon içeriğinin düşük olmasından dolayı duman emisyonlarının azaldığı da belirtilmiştir. Oksijen içerikli yakıtlar silindir içi sıcaklığı arttırmaktadır. Bu artışın yanma verimini olumlu etkileyerek bölgesel sıcaklık değişimini önlediği düşünülmektedir. Bölgesel sıcaklık değişimi ve oksijen konsantrasyonu dağılımı oluşumunu tetikleyen temel mekanizmalardır. [76].

B50 yakıtının duman emisyon değerleri de, B50+20Mn+PG, B50+40Mn+PG ve B50+60Mn+PG yakıtlarının duman emisyon değerleriyle karşılaştırılmıştır. Test yakıtlarının duman emisyonu değerleri Tablo 5.23'de sunulmuştur. Katkı ilaveli yakıtlar, B50 yakıtının duman emisyon değerleriyle kıyaslandığında; B50+20Mn+PG yakıtında % 27, B50+40Mn+PG yakıtında % 33.7, B50+60Mn+PG yakıtında % 37.5 oranında bir azalma tespit edilmiştir.

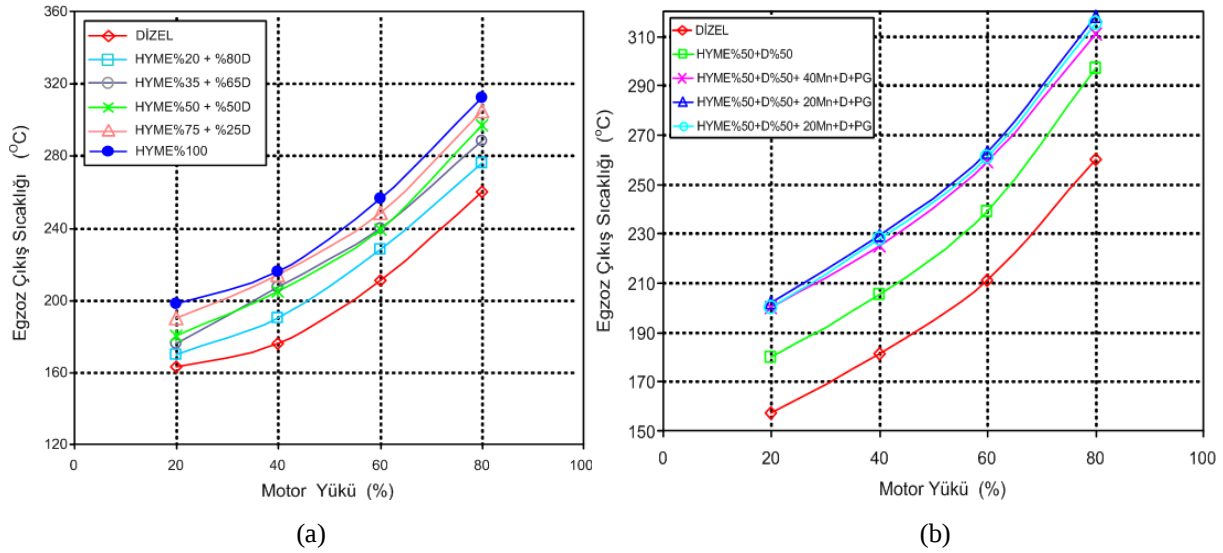
Şekil 5.23(b)'den görüldüğü gibi, katkı maddelerinin ilavesi ile duman emisyonu değerlerinde azalma olmuştur. Kullanılan katkı maddelerinin oksijen oranı biyodizel yakıtlarına kıyasla daha fazladır. B50 yakıtının Mn, propilen glikol ve dodekanol gibi katkı maddeleriyle desteklenmesi karbon oranını düşürüp oksijen oranı arttırmaktadır. Oksijen miktarının artması, yanma sırasında oksitlenme reaksiyonu hızlandırarak duman oluşumu azalttığı düşünülmektedir. Ayrıca yakıta ilave edilen katkı maddeleri yanma reaksiyonuna istikrarlı bir yapı kazandırıp, alev içerisinde türbülanslı karışım alanları ve duman emisyonları oluşumlarını engellediği düşünülmektedir.

### **5.3.8. HYME İçerikli Yakıt Numunelerinin Egzoz Gazları Sıcaklık Analizi**

İçten yanmalı motorlarda silindir içerisinde yakıtın yanması sonucu elde edilen ısı enerjisinin bir kısmı soğutma, egzoz ve sürtünme yolu ile kaybedilmektedir. Kaybedilen bu enerji kayıplar neticesinde geriye kalan ısı enerjisi mekanik enerjiye dönüştürülerek motordaki güç elde edilmektedir.

**Tablo 5.24.** HYME için hazırlanan yakıt türlerinin değişken yükteki egzoz çıkış sıcaklığı değerleri

| Yakıt Türü    | Egzoz çıkış sıcaklığı (°C) |      |      |      |
|---------------|----------------------------|------|------|------|
|               | % 20                       | % 40 | % 60 | % 80 |
| DY            | 163                        | 176  | 211  | 260  |
| B20           | 170                        | 190  | 228  | 276  |
| B35           | 176                        | 207  | 240  | 288  |
| B50           | 180                        | 205  | 239  | 297  |
| B75           | 190                        | 214  | 248  | 305  |
| B100          | 198                        | 216  | 256  | 312  |
| B50+20Mn+D+PG | 200                        | 225  | 259  | 311  |
| B50+40Mn+D+PG | 202                        | 229  | 263  | 318  |
| B50+60Mn+D+PG | 200                        | 228  | 261  | 315  |



**Şekil 5.24.** HYME için hazırlanan yakıt türlerinin egzoz çıkış sıcaklığı değişimi;

(a) Biyodizel içerikli numuneler, (b) Katkı maddeli numuneler

HYME'den hazırlanan B20, B35, B50, B75 ve B100 yakıtlarının ölçülen egzoz çıkış sıcaklığı değerleri, dizel yakıtın değerleriyle karşılaştırılmıştır. Ölçülen egzoz çıkış sıcaklığı değerleri Tablo 5.24'de sunulmuştur. Biyodizel yakıtları, dizel yakıtının egzoz çıkış sıcaklığı değerleriyle kıyaslandığında; B20 yakıtında % 7, B35 yakıtında % 12.5, B50 yakıtında % 14, B75 yakıtında % 18.35 ve B100 yakıtında % 21.5 oranında bir artış tespit edilmiştir.

Şekil 5.24(a)'dan görüldüğü gibi, motordaki yükün artmasıyla beraber test yakıtlarının egzoz çıkış sıcaklıkları artmıştır. Motorda üretilmesi gereken gücü arttırabilmek için daha fazla ısı enerjisine ihtiyaç duyulmaktadır. Yanma odasındaki ısı enerjisinin yüksek olması, egzoz çıkış sıcaklığının yüksek olmasına sebep olduğu düşünülmektedir. Motorda biyodizel

yakıtının kullanılmasıyla egzoz çıkış sıcaklığının arttığı Şekil 5.24(a)'dan görülmektedir. Dizel yakıtı ile biyodizel yakıtının egzoz çıkış sıcaklığı değerlerindeki farklılığa, biyodizel yakıtının oksijen içeriği ve setan sayısının yüksek olması gibi özelliklerden kaynaklandığı düşünülmektedir. Test yakıtlarının, içeriğindeki oksijen nispetinde iyi bir yanma performansı sergileyerek, farklı değerlerde egzoz çıkış sıcaklığı oluşturduğu düşünülmektedir. Ayrıca biyodizelin sahip olduğu yüksek viskozite ve setan sayısından dolayı daha yavaş ve uzun bir yanmanın gerçekleşiyor olması biyodizel kullanımında daha yüksek egzoz sıcaklığın oluşmasına sebep olarak gösterilebilir. Dizel motorlarda yakıt olarak biyodizel kullanıldığında yanmanın daha uzun devam etmesinden dolayı egzoz sıcaklığının daha yüksek çıktığını belirtmiştir [78]. Egzoz gazı sıcaklığının tutuşma gecikmesinden etkilendiğini ve biyodizelin setan sayısının yüksek olmasından dolayı daha düşük tutuşma gecikmesi periyodu sergilediğini ve bunun da biyodizel kullanıldığında egzoz gazı sıcaklığını artırdığını belirtmiştir [13].

B50 yakıtının egzoz çıkış sıcaklığı değerleri de, B50+20Mn+PG, B50+40Mn+PG ve B50+60Mn+PG yakıtlarının egzoz çıkış sıcaklığı değerleriyle karşılaştırılmıştır. Test yakıtlarının egzoz çıkış sıcaklığı değerleri Tablo 5.24'de sunulmuştur. Katkı ilaveli yakıtlar, B50 yakıtının egzoz çıkış sıcaklığı değerleriyle kıyaslandığında; B50+20Mn+PG yakıtında % 7.85, B50+40Mn+PG yakıtında % 10, B50+60Mn+PG yakıtında % 9.2 oranında bir artış tespit edilmiştir.

Şekil 5.24(b)'den görüldüğü gibi, B50 yakıtına ilave edilen Mn, dodekanol ve propilen glikol gibi katkı maddeleri egzoz çıkış sıcaklık değerlerini arttırmıştır. Katkı maddeleri yakıtın setan sayısını ve oksijen içeriğini arttırdığı ve neticesinde de iyi bir yanma karakteristiğinin oluşmasına katkı sağladığı düşünülmektedir. Yüksek setan sayısı daha düşük tutuşma gecikmesi periyodu oluşturduğundan egzoz gazı sıcaklığı artmaktadır. Yakıtın kimyasal bağ yapısındaki oksijen miktarının artması, yakıtlara olumlu bir yanma performansı kazandırarak, egzoz çıkış sıcaklığını arttırmaktadır[13,78].

#### 5.4. CYME İçin Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Ceviz yağından elde edilen biyodizeller (CYME), belli oranlarda dizel yakıt ile karıştırılarak beş farklı yakıt numunesi elde edilmiştir. Ayrıca B50 yakıtına değişik özellikteki katkı maddeleri ilave edilerek, numunelerin ÖYT ve egzoz emisyon değerleri test edilmiştir. Test işleminin sonunda elde edilen değerler karşılaştırmalı bir şekilde aşağıda sunulmuştur.

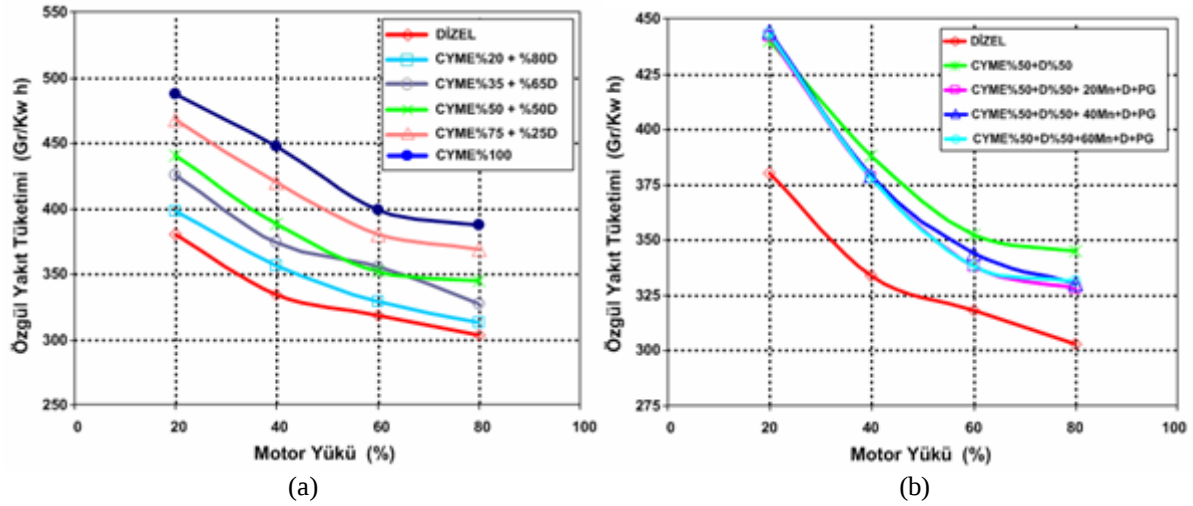
##### 5.4.1. CYME İçerikli Yakıt Numunelerinin Özgül Yakıt Tüketimi Analizi

Özgül yakıt tüketimi, birim güç başına tüketilen kütsel yakıt miktarı olarak tanımlanmaktadır.

Bu çalışmada, sabit yükte, devir değişimine bağlı özgül yakıt tüketimi (ÖYT) ölçümü yerine, sabit hızda, yük değişimine bağlı ÖYT ölçümü gerçekleştirilmiştir. Test motoru, 1500 dev/dak.'lık sabit hızda, %20, %40, %60 ve %80 değişken yük şartlarında çalıştırılarak ÖYT değerleri ölçülmüştür. Motor devri, motor test düzeneğinde bulunan elektronik hız kontrol ünitesiyle sabit tutulmuştur. Elektronik hız kontrol ünitesi, motor devrini sabit tutmak için, yükün artışına bağlı olarak tüketilecek yakıtın miktarını otomatik olarak arttırmaktadır.

**Tablo 5.25.** CYME yakıt türlerinin değişken yükteki ÖYT değerleri

| Yakıt türü    | ÖYT değeri (gr/kWh) |      |      |      |
|---------------|---------------------|------|------|------|
|               | % 20                | % 40 | % 60 | % 80 |
| DY            | 380                 | 334  | 318  | 303  |
| B20           | 398                 | 356  | 329  | 313  |
| B35           | 425                 | 374  | 355  | 327  |
| B50           | 440                 | 388  | 352  | 345  |
| B75           | 468                 | 420  | 380  | 369  |
| B100          | 487                 | 447  | 399  | 387  |
| B50+20Mn+D+PG | 442                 | 378  | 338  | 328  |
| B50+40Mn+D+PG | 444                 | 379  | 344  | 330  |
| B50+60Mn+D+PG | 443                 | 378  | 338  | 331  |



Şekil 5.25. CYME için hazırlanan yakıt türlerinin ÖYT emisyonlarının değişimi;

(a) Biyodizel içerikli numuneler, (b) Katkı maddeli numuneler

1500 dev/dak.'lık sabit hızda, %20, %40, %60 ve %80 değişken yük şartlarında çalıştırılarak ÖYT ölçülmüştür. CYME'den hazırlanan B20, B35, B50, B75 ve B100 yakıtlarının motor performans testlerinden ölçülen ÖYT değerleri, dizel yakıtın değerleriyle karşılaştırılmıştır. Ölçülen ÖYT değerleri Tablo 5.25'de sunulmuştur. Biyodizel yakıtları, dizel yakıtının ÖYT değerleriyle kıyaslandığında; B20 yakıtında % 4.9, B35 yakıtında % 11.15, B50 yakıtında % 14.5, B75 yakıtında % 23 ve B100 yakıtında % 29.2 oranında bir artış tespit edilmiştir.

Şekil 5.25(a)'da görüldüğü gibi Tüm yakıt türleri arasında en düşük özgül yakıt tüketiminin dizel yakıtı kullanıldığında, en yüksek özgül yakıt tüketiminin de B100 kullanıldığında elde edilmiştir. Test yakıtlarının ÖYT değerleri, dizel yakıtı içerisindeki biyodizel miktarının artmasıyla orantılı bir şekilde artmaktadır. Biyodizel yakıtının; ısıl değerinin düşük, viskozite ve yoğunluk değerlerinin yüksek olması, ÖYT değerlerinin yüksek değerde çıkmasına sebep olduğu düşünülmektedir. Şekil 5.25(a)'da görüldüğü gibi, aynı yük şartlarında test edilen dizel ve biyodizel yakıtları aynı gücü üretmelerine rağmen biyodizel yakıtının ÖYT değeri dizel yakıtına kıyasla daha yüksektir. Belirtilen bu durum üç nedene bağlanmıştır. Birinci neden, formüsel olarak da hesaplanabileceği üzere, birbirleri arasındaki yoğunluk farkıdır. Çünkü enjeksiyon pompası yakıtları hacimsel olarak ölçerek silindirlere göndermektedir. Biyodizelin yoğunluğunun dizel yakıtına göre yüksek olmasından dolayı kütsel yakıt tüketimi, biyodizel yakıtlarında yüksek değerde çıkmaktadır. Diğer bir deyişle, yoğunluğu yüksek olan yakıt numunesinin silindirlere gönderilen gram cinsinden değeri fazladır. Yoğunluğu yüksek değerde olan yakıt numunelerinde ÖYT değerlerinin yüksek

çıkması kaçınılmaz bir sonuçtur. İkinci neden ise; test yakıtları arasındaki viskozite farklılığıdır. Yüksek viskoziteye sahip yakıtlar aynı enjektör basıncıyla ve aynı enjektör memesinin delik çapından püskürtüldüğünde daha iri taneli olarak yanma odasına giriş yapmaktadır. Bu durumda yakıt molekülleri, sıkıştırılmış hava ile iyi bir karışım gerçekleştiremeyecektir. Sonuç olarak, yakıtın buharlaşma ve yanma verimi olumsuz etkilenecektir. Bu durum harcanan yakıt miktarını arttıracığından, ÖYT değerlerini de o oranda yükselecektir [24,59]. ÖYT'yi etkileyen faktörlerden bir diğeri ise yakıtın ısıl değeridir. Her yakıt numunesi için aynı yük şartlarında test yapıldığında, yanma reaksiyonunun sonunda aynı ısı enerjisi elde edilmesi gerekir. Eşit ısı enerjisi sağlayabilmek için, dizel yakıtına kıyasla biyodizel yakıtından kütleli olarak daha fazla yanma odasına alınması gerekir. Ancak bu şartlarda yakıtlar arası enerji eşdeğerliği sağlanmış olabilir. Bu durum ise, biyodizel yakıtlarında daha fazla yakıt tüketimine sebep olmaktadır. Sonuç olarak, püskürtülen yakıtın; yoğunluğu, viskozitesi ve ısıl değeri ÖYT doğrudan etkileyen unsurlardır [12,56,60,61].

B50 yakıtının ÖYT değerleri de, katkı ilaveli yakıtlarının ÖYT değerleriyle karşılaştırılmıştır. Test yakıtlarının ÖYT değerleri Tablo 5.25'de sunulmuştur. Katkı ilaveli yakıtlar, B50 yakıtının ÖYT değerleriyle kıyaslandığında; B50+20Mn $\mu$ mol/lit+PG yakıtında % 2.5, B50+40Mn $\mu$ mol/lit +PG yakıtında % 1.8, B50+60Mn $\mu$ mol/lit+PG yakıtında % 2.2 oranında bir azalma tespit edilmiştir.

Katkı maddelerin, ilave edildikleri yakıtların ÖYT değerlerinin azalmasına katkı sağladığı Şekil 5.25(b)'den görülmektedir. Katkı maddelerinin yakıt numunelerinde; setan sayısı, viskozite, yoğunluk ve parlama noktası gibi özellikleri iyileştirmesinin ve ayrıca yanma reaksiyonunda katalizör olarak görev yapmasının, neticesinde ÖYT değerlerinin azaldığı düşünülmektedir. Ayrıca, B50 yakıtına ilave edilen Mn bazlı katkı maddesi miktarlarının artışına bağlı olarak ÖYT değerinin daha da azaldığı Şekil 5.25(b)'den görülmektedir. Metal bazlı katkı maddesinin yakıtı ilave edilmesinin; setan sayısı, viskozite ve parlama noktası gibi özelliklere olumlu yönde katkı sağladığı belirtilmiştir [24-27]. Fakat metal bazlı katkı maddelerinin yakıtı ilave edilme oranının bir optimum değerinin olduğu, bu değer üzerine çıkıldığında ise, setan sayısı, yoğunluk, viskozite ve parlama noktası gibi özelliklerinin olumsuz bir şekilde etkilendiği de ayrıca belirtilmiştir [27]. CYME'den hazırlanan B50 yakıtına, 20,40 ve 60  $\mu$ mol/lit ölçeğinde Mn dozlaması yapılmıştır. Belirtilen bu ölçekler arasında, en iyi performansın 20  $\mu$ mol/lit ölçeğindeki Mn kullanımında gerçekleştiği Şekil 5.25(b)'den görülmektedir. Her ne kadar biyodizel yakıtlarının karbon, hidrojen ve oksijen oranları birbirlerine benzer değerlerde olsa da, Tablo 3.1'deki yağ asit

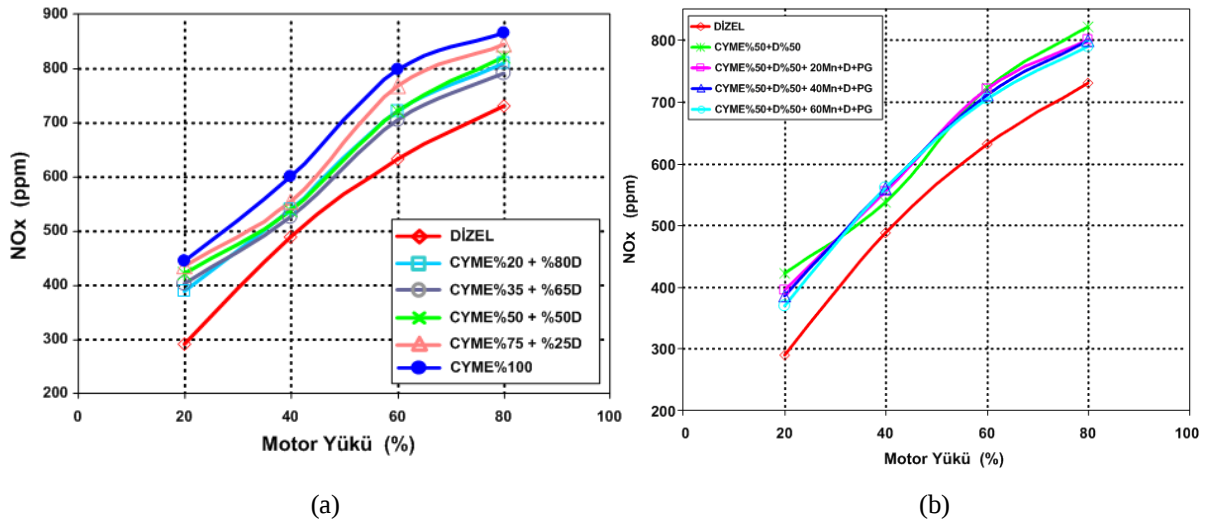
kompozisyonu değerlerinden görüldüğü gibi kimyasal bağ yapıları birbirlerinden farklıdır. Bu sebeple, Mn bazlı katkı maddesinin en uygun dozlama miktarının değişken değerlerde olması beklenen bir durumdur. Yapılan motor testleri neticesinde, Mn bazlı katkı maddesinin yakıtta ilave edilme oranındaki optimum değer 20  $\mu\text{mol/l}$ t olduğu Şekil 5.25(b)'den görülmektedir.

#### 5.4.2. CYME İçerikli Yakıt Numunelerinin NO<sub>x</sub> Emisyonları Analizi

NO<sub>x</sub>'ler genellikle, motorun yüksek sıcaklıklardaki çalışma şartlarında oluşmaktadır. NO<sub>x</sub> terimi NO ve NO<sub>2</sub>'nin atmosferdeki toplam yoğunluğunun ifadesidir. Dizel motorlar yanma reaksiyonunu oluştururken diğer motor tiplerine göre daha fazla hava kullanmaktadır. Kullanılan havanın içeriğindeki oksijen, aşırı sıcak çalışma şartlarında ve yanma için yeterli zaman oluştuğunda, azot ile reaksiyona girer. Bu reaksiyon sonucunda NO<sub>x</sub> emisyonları oluşur. NO<sub>x</sub> genellikle, kontrolsüz yanma aşamasında meydana gelmektedir. Biyodizelin oksijen içeriği nedeniyle dizel yakıtla kıyasla daha yüksek NO<sub>x</sub> salınımına sebebiyet vereceği belirtilmiştir. Biyodizel ile çalışan motorlarda silindir içi basıncın ve sıcaklık değerlerinin yüksek oluşu, NO<sub>x</sub> emisyonu oluşmasına neden olarak gösterilmiştir [62-64]. NO<sub>x</sub> oluşumu büyük oranda silindir içi sıcaklığa, basınca, tutuşma gecikmesi ve yanma süresine bağlıdır [65-67].

**Tablo 5.26.** CYME yakıt türlerinin değişken yükteki NO<sub>x</sub> değerleri

| Yakıt türü    | NO <sub>x</sub> emisyonu (ppm) |      |      |      |
|---------------|--------------------------------|------|------|------|
|               | % 20                           | % 40 | % 60 | % 80 |
| DY            | 290                            | 488  | 632  | 731  |
| B20           | 388                            | 540  | 720  | 810  |
| B35           | 402                            | 525  | 704  | 790  |
| B50           | 422                            | 537  | 722  | 822  |
| B75           | 435                            | 554  | 768  | 845  |
| B100          | 444                            | 599  | 798  | 866  |
| B50+20Mn+D+PG | 395                            | 555  | 720  | 800  |
| B50+40Mn+D+PG | 385                            | 560  | 711  | 799  |
| B50+60Mn+D+PG | 370                            | 561  | 705  | 790  |



Şekil 5.26. CYME için hazırlanan yakıt türlerinin NO<sub>x</sub> emisyonlarının değişimi;

(a) Biyodizel içerikli numuneler, (b) Katkı maddeli numuneler

CYME'den hazırlanan B20, B35, B50, B75 ve B100 yakıtlarının NO<sub>x</sub> emisyonu değerleri, dizel yakıtın değerleriyle karşılaştırılmıştır. Ölçülen NO<sub>x</sub> emisyonu değerleri Tablo 5.26'de sunulmuştur. Biyodizel yakıtları, dizel yakıtının NO<sub>x</sub> emisyonu değerleriyle kıyaslandığında; B20 yakıtında % 14.85, B35 yakıtında % 13.1, B50 yakıtında % 17, B75 yakıtında % 21.5 ve B100 yakıtında % 26.4 oranında bir artış tespit edilmiştir.

Şekil 5.26(a)'da görüldüğü gibi, düşük yüklerde silindir içi sıcaklığının düşük olması, bütün test yakıtları için NO<sub>x</sub> emisyonunun düşük çıkmasına neden olmuştur. Motordaki yükün artışı ile NO<sub>x</sub> emisyonlarında da aynı paralelde bir artış gözlemlenmiştir. Yükün artmasıyla beraber NO<sub>x</sub> emisyon değerlerindeki bu artış; silindir içi sıcaklığın artması ve daha fazla yakıt tüketimi gibi sebeplere bağlanmıştır. Şekil 5.32(a)'daki Egzoz çıkış sıcaklık değerleri ve Şekil 5.25(a)'daki ÖYT değerleri de bu durumu desteklemektedir. Silindir içi sıcaklığın artması, silindir içi hava hareketliliğini oluşturarak NO<sub>x</sub> emisyonlarının oluşumuna zemin hazırlamaktadır [64]. Fakat dizel yakıtı içerisindeki biyodizel oranının artmasıyla sıcaklık değerleri daha da yükselmekte, bu yükselmenin neticesinde ise; basınç, hava hareketliliği gibi oluşumların daha hızlı gerçekleştiği düşünülmektedir. Aynı yük şartlarında NO<sub>x</sub> emisyonu değerleri arasındaki farklılığın bir diğer nedeni ise, yakıt numunelerin ısıtılma değerleri arasındaki farklılıktan kaynaklandığı düşünülmektedir. Biyodizel yakıtlarının, aynı enerjiyi elde edebilmeleri için kütsel olarak daha fazla kullanılması gerekir. Gram cinsinden daha fazla yakıtın kullanılması, NO<sub>x</sub> emisyonlarının artmasına sebep olarak gösterilebilir.

B50 yakıtının NO<sub>x</sub> emisyonu değerleri de, B50+20Mn+PG, B50+40Mn+PG ve B50+60Mn+PG yakıtlarının NO<sub>x</sub> emisyonu değerleriyle karşılaştırılmıştır. Test yakıtlarının

NO<sub>x</sub> emisyonu değerleri Tablo 5.26’de sunulmuştur. Katkı ilaveli yakıtlar, B50 yakıtının NO<sub>x</sub> emisyonu değerleriyle kıyaslandığında; B50+20Mn+PG yakıtında % 1.2, B50+40Mn+PG yakıtında % 1.8, B50+60Mn+PG yakıtında % 3 oranında bir azalma tespit edilmiştir.

Katkı maddelerinin yapısında oksijen bulunması ve egzoz çıkış sıcaklık değerlerinin yüksek olması sebebiyle, NO<sub>x</sub> emisyonlarının daha yüksek olması beklenmektedir. Ancak beklenenin tersine NO<sub>x</sub> emisyonu değerlerinde bir düşüş olduğu Şekil 5.26(b)’den görölmektedir. Yakıt numunelerine katkı maddelerinin ilave edilmesiyle, setan sayısının artması, ÖYT değerlerinin ve parlama noktasının düşmesi gibi sebeplerin neticesinde NO<sub>x</sub> emisyonlarının azalttığı düşünölmektedir. Nitekim hayvansal iç yağı metil esteri ve karışımlarının kullanıldığı bir çalışmada, özgül yakıt tüketimi ve egzoz çıkış sıcaklığı değerlerinin dizel yakıtına göre yüksek olmasına rağmen daha düşük NO<sub>x</sub> emisyonları elde edilmiştir. Yakıt numunelerinin dizel yakıtına göre yüksek setan sayısına ve daha düşük parlama noktasına sahip olması ile açıklanmıştır. Setan sayısının artması ile NO<sub>x</sub> emisyonlarının azaldığı da ayrıca vurgulanmıştır.[68]. Katkı maddeleri, tutuşma gecikmesini önleyerek azot ile oksijenin reaksiyona gireceği süreyi kısalttığı düşünölmektedir. Katkılı numunelerdeki yanma sürenin kısalması, NO<sub>x</sub> oluşumunun azalmasına sebep olarak gösterilebilir.

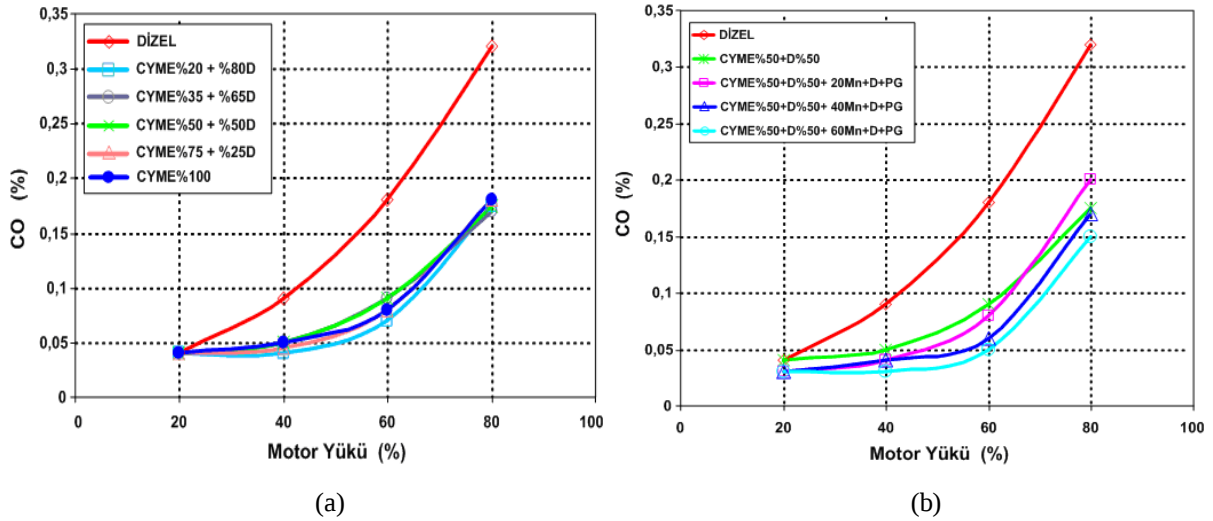
Biyodizel yakıtlarının viskozitelerinin ve parlama noktalarının yüksek olması, tutuşma gecikmesine sebep olmakta, neticesinde azot ile oksijenin reaksiyona girebileceği zaman diliminin oluşturmaktadır [63].

#### **5.4.3. CYME İçerikli Yakıt Numunelerinin Karbon monoksit (CO) Emisyonları Analizi**

CO emisyonlarının oluşumu dizel motorlarda birçok nedene bağlanabilir. Gaz sıcaklığının düşük olması, yeterli oksijenin bulunmaması ve CO<sub>2</sub>’ye dönüşüm için yeterli zamanın kalmamasından dolayı yanmanın tamamlanmamış olması CO miktarını artırır[69]. Biyodizel yakıtının oksijen içermesi, düşük karbon oranı ve yüksek setan sayısı CO emisyonlarındaki azalmanın temel sebepleridir [45,70-76].

**Tablo 5.27.** CYME için hazırlanan yakıt türlerinin değişken yükteki CO değerleri

| Yakıt Türü    | CO Emisyonu (%) |       |      |       |
|---------------|-----------------|-------|------|-------|
|               | % 20            | % 40  | % 60 | % 80  |
| DY            | 0,04            | 0,09  | 0,18 | 0,32  |
| B20           | 0,04            | 0,04  | 0,07 | 0,175 |
| B35           | 0,04            | 0,05  | 0,09 | 0,17  |
| B50           | 0,04            | 0,05  | 0,09 | 0,175 |
| B75           | 0,04            | 0,045 | 0,08 | 0,18  |
| B100          | 0,04            | 0,05  | 0,08 | 0,18  |
| B50+20Mn+D+PG | 0,03            | 0,04  | 0,08 | 0,2   |
| B50+40Mn+D+PG | 0,03            | 0,04  | 0,06 | 0,17  |
| B50+60Mn+D+PG | 0,03            | 0,03  | 0,05 | 0,15  |



**Şekil 5.27.** CYME için hazırlanan yakıt türlerinin CO emisyonlarının değişimi;

(a) Biyodizel içerikli numuneler, (b) Katkı maddeli numuneler

CYME’den hazırlanan B20, B35, B50, B75 ve B100 yakıtlarının ölçülen CO emisyonu değerleri, dizel yakıtın değerleriyle karşılaştırılmıştır. Ölçülen CO emisyonu değerleri Tablo 5.27’de sunulmuştur. Biyodizel yakıtları, dizel yakıtının CO emisyonu değerleriyle kıyaslandığında; B20 yakıtında % 48.1, B35 yakıtında % 44.2, B50 yakıtında % 43.7 B75 yakıtında % 45 ve B100 yakıtında % 44.2 oranında bir azalma tespit edilmiştir.

Tüm test yakıtları için motordaki yük arttıkça CO emisyonlarının da aynı paralelde arttığı Şekil 5.27(a)’dan görülmektedir. Yükün artmasıyla beraber CO emisyonlarındaki bu artış, kütsel olarak daha fazla yakıt kullanılmasına bağlanmıştır. Yükün artmasıyla beraber gram cinsinden daha fazla yakıt kullanılması CO emisyonlarının artışına sebep olarak

gösterilebilir. Biyodizel yakıtlarının CO emisyonlarının, dizel yakıtına göre daha düşük değerlerde olduğu Şekil 5.27(a)'da görülmektedir. Biyodizel yakıtının setan sayısının yüksek olması ve kimyasal bağ yapısında oksijen bulundurması biyodizel yakıtlarının CO emisyonu değerlerindeki azalmaya sebep olduğu düşünülmektedir. Test yakıtlarının CO emisyon değerleri %20 yükte benzer değerde iken, %40, %60, %80 yük şartlarında, yakıtların CO emisyon değerleri arasında belirgin farklılıklar olduğu Şekil 5.27(a)'dan görülmektedir. Dizel yakıtı içerisindeki biyodizel oranının arttırılmasıyla, setan sayısı ve oksijen içeriği gibi değerlerin arttığı ve bu durumun ise test yakıtları arasındaki CO emisyonlarının farklı değerlerde oluşmasına sebep olduğu düşünülmektedir. Yakıtların yanma performansını etkileyecek özellikleri ne kadar iyi olursa, CO emisyon değerlerinin de o nispette düşük olacağı düşünülmektedir.

B50 yakıtının CO emisyonu değerleri de, B50+20Mn+PG, B50+40Mn+PG ve B50+60Mn+PG yakıtlarının CO emisyonu değerleriyle karşılaştırılmıştır. Test yakıtlarının CO emisyonu değerleri Tablo 5.27'de sunulmuştur. Katkı ilaveli yakıtlar, B50 yakıtının CO emisyonu değerleriyle kıyaslandığında; B50+20Mn+PG yakıtında % 1, B50+40Mn+PG yakıtında % 15, B50+60Mn+PG yakıtında % 25 oranında bir azalma tespit edilmiştir.

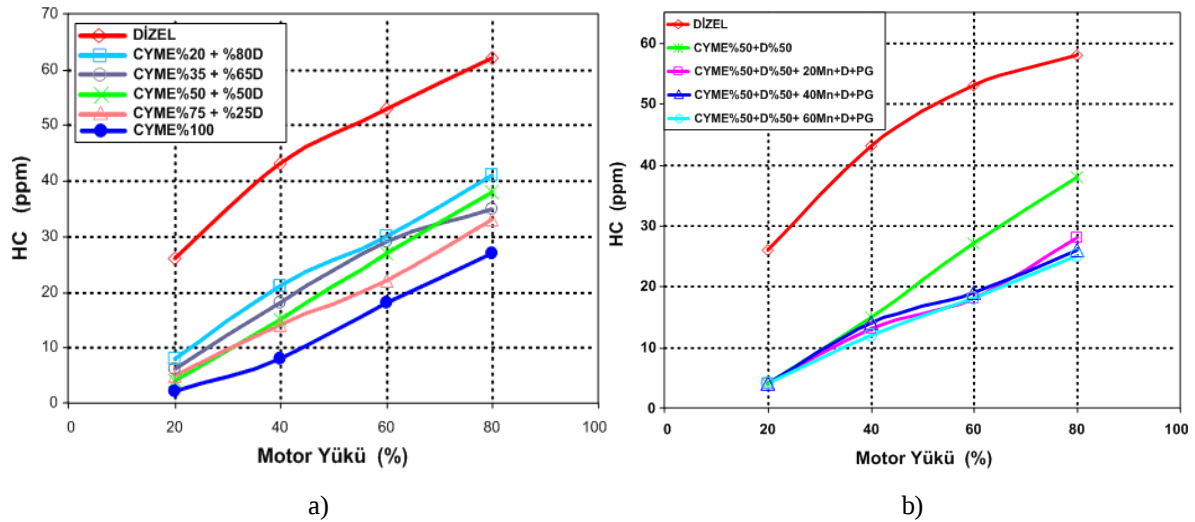
Katkı ilaveli yakıtların CO emisyonu değerleri B50 yakıtına göre daha düşük olduğu Şekil 5.27(b)'de görülmektedir. Katkı maddeleri, ilave edildikleri yakıtın; setan sayısı, parlama noktası, viskozite ve yoğunluk gibi özelliklerini iyileştirmesiyle, B50 yakıtına göre daha iyi bir yanma performansı sağladığı düşünülmektedir [45,70-76]. Şekil 5.27(b)'de görüldüğü gibi, yakıtta Mn ilavesi miktarının artırılmasıyla, CO emisyon değerleri düşmüştür. Mn bazlı katkı maddesinin, yakıtların yanma performansını etkileyecek özelliklerini iyileştirmektedir [70]. Yanma performansının iyileşmesi, CO emisyonunun CO<sub>2</sub>'ye dönüşümü için zaman kazandırdığı düşünülmektedir. Katkı ilaveli numunelerin CO<sub>2</sub> emisyonlarının B50 yakıtına göre yüksek çıkması, belirtilen bu durumu desteklemektedir.

#### **5.4.4. CYME İçerikli Yakıt Numunelerinin Hidrokarbon (HC) Emisyonları Analizi**

HC emisyonlarının oluşmasında iki önemli unsur ön plana çıkmaktadır. Birincisi, önceki çevrimden kalan yanmış gazlardır[77]. Motordaki iş sonunda, enjektör ucuna yakın kör noktalarda ve enjektör deliğinde bir miktar da olsa, bir sonraki çevrime yanmış gazlar kalır. Yanma odasında kalan bu gazlar bir sonraki çevrimde sıkıştırılan hava ile karışır. Bu durum yeni hava-yakıt karışımının oksijen oranını düşürerek HC emisyonlarının oluşmasına sebebiyet vermektedir [78].

**Tablo 5.28.** CYME için hazırlanan yakıt türlerinin değişken yükteki HC değerleri

| Yakıt türü    | HC emisyonu (ppm) |      |      |      |
|---------------|-------------------|------|------|------|
|               | % 20              | % 40 | % 60 | % 80 |
| DY            | 26                | 43   | 53   | 62   |
| B20           | 8                 | 21   | 30   | 41   |
| B35           | 6                 | 18   | 29   | 35   |
| B50           | 4                 | 15   | 27   | 38   |
| B75           | 5                 | 14   | 22   | 33   |
| B100          | 2                 | 8    | 18   | 27   |
| B50+20Mn+D+PG | 4                 | 13   | 18   | 28   |
| B50+40Mn+D+PG | 4                 | 14   | 19   | 26   |
| B50+60Mn+D+PG | 4                 | 12   | 18   | 25   |



**Şekil 5.28.** CYME için hazırlanan yakıt türlerinin HC emisyonlarının değişimi;

(a) Biyodizel içerikli numuneler, (b) Katkı maddeli numuneler

CYME'den hazırlanan B20, B35, B50, B75 ve B100 yakıtlarının ölçülen HC değerleri, dizel yakıtın değerleriyle karşılaştırılmıştır. Ölçülen HC emisyonu değerleri Tablo 5.28'de sunulmuştur. Biyodizel yakıtları, dizel yakıtının HC emisyonu değerleriyle kıyaslandığında; B20 yakıtında % 44.9, B35 yakıtında % 52, B50 yakıtında % 53.5, B75 yakıtında % 59.1 ve B100 yakıtında % 70.1 oranında bir azalma tespit edilmiştir.

Motorda biyodizel yakıtının kullanılmasıyla HC emisyonlarında azalma olduğu Şekil 5.28(a)'dan görülmektedir. Bu azalmanın, biyodizel yakıtlarının yapısındaki oksijenden kaynaklandığı düşünülmektedir. Biyodizel yakıtının oksijen içeriğinin fazla olması yanma reaksiyonuna ek katkı sağlayarak, HC emisyonlarının azalmasına neden olduğu

düşünülmektedir. Test edilen yakıt numunelerinin HC emisyon değerlerinde belirgin farklılığın olduğu Şekil 5.28(a)'dan görülmektedir. Her yakıt numunesinin kimyasal içeriğinde değişken oranda oksijen bulunması ve dizel yakıt içerisindeki biyodizel oranının artmasıyla setan sayısı değerinin de aynı paralelde artış göstermesi bu belirgin farklılığın sebebi olarak gösterilebilir. Motordaki yükün artmasıyla beraber tüm yakıtların CO emisyon değerlerinde artış gözlenmiştir. Bu artışın nedeni; yükün artmasına paralel olarak kütleli yakıt sarfiyatının artması şeklinde açıklanabilir.

Literatürde yapılan çalışmalarda; dizel yakıtının, yanma odasında hava ile istenen düzeyde bir karışım oluşturmaması neticesinde yüksek CO ve HC emisyonlarının olduğu belirtilmiştir. Biyodizel karışimli yakıtların yapısında oksijen bulunması sebebiyle; CO, HC ve duman emisyonlarında azalma tespit edilmiştir. Çünkü yakıtın oksijen içeriği yanma sırasında ek oksijen sağlayarak tam yanmayı geliştirmekte ve bu durumun HC emisyonlarının azalmasına katkı sağladığı belirtilmiştir. Bununla beraber setan sayısı, kaynama noktası, kükürt ve aromatik bileşen içeriği gibi özelliklerin de CO, HC ve duman emisyonlarındaki değişim üzerinde etkili olduğunu ifade edilmiştir [70,71,77,78].

B50 yakıtının HC emisyonu değerleri de, B50+20Mn+PG, B50+40Mn+PG ve B50+60Mn+PG yakıtlarının HC emisyonu değerleriyle karşılaştırılmıştır. Test yakıtlarının HC emisyonu değerleri Tablo 5.28'de sunulmuştur. Katkı ilaveli yakıtlar, B50 yakıtının HC emisyonu değerleriyle kıyaslandığında; B50+20Mn+PG yakıtında % 25, B50+40Mn+PG yakıtında % 25, B50+60Mn+PG yakıtında % 30 oranında bir azalma tespit edilmiştir.

Test yakıtlarına katkı maddelerinin ilave edilmesiyle HC emisyon değerleri B50 yakıtına kıyasla azalma olduğu Şekil 5.28(b)'de görülmüştür. Katkı maddeleri yakıtın setan sayısını ve oksijen içeriğini arttırdığı ve neticesinde de iyi bir yanma karakteristiğinin oluşmasına katkı sağladığı düşünülmektedir. Propilen glikolun ve dodekanolun oksijen bakımından zengin bir yapıya sahip olması, Mn bazlı katkı maddesinin ise setan sayısı üzerinde olumlu bir katkı sağladığı düşünülmektedir.

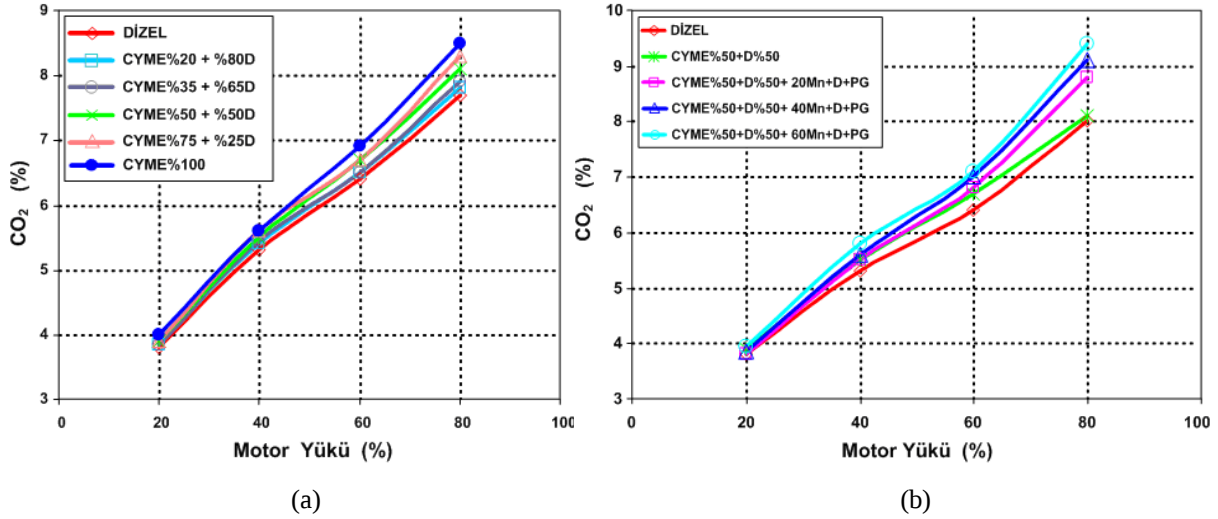
#### **5.4.5. CYME İçerikli Yakıt Numunelerinin Karbondioksit (CO<sub>2</sub>) Emisyonları**

##### **Analizi**

CO<sub>2</sub> emisyonları doğrudan yanma ile ilgilidir. Dizel bir motor düşük devirde çalışıyorsa, yanma performansı da düşüktür. Çünkü düşük devirlerde silindir içi sıcaklık değeri optimum şartlarda olmadığı için kötü bir yanma reaksiyonu gerçekleşmektedir [78].

**Tablo 5.29.** CYME için hazırlanan yakıt türlerinin değişken yükteki CO<sub>2</sub> değerleri

| Yakıt türü    | CO <sub>2</sub> emisyonu (%) |      |      |      |
|---------------|------------------------------|------|------|------|
|               | % 20                         | % 40 | % 60 | % 80 |
| DY            | 3,8                          | 5,3  | 6,4  | 7,7  |
| B20           | 3,85                         | 5,4  | 6,5  | 7,8  |
| B35           | 3,85                         | 5,45 | 6,5  | 7,9  |
| B50           | 3,9                          | 5,5  | 6,7  | 8,1  |
| B75           | 3,9                          | 5,6  | 6,7  | 8,3  |
| B100          | 4                            | 5,6  | 6,9  | 8,5  |
| B50+20Mn+D+PG | 3,8                          | 5,5  | 6,8  | 8,8  |
| B50+40Mn+D+PG | 3,85                         | 5,6  | 7    | 9,1  |
| B50+60Mn+D+PG | 3,95                         | 5,8  | 7,1  | 9,4  |



**Şekil 5.29.** CYME için hazırlanan yakıt türlerinin CO<sub>2</sub> emisyonlarının değişimi;

(a) Biyodizel içerikli numuneler, (b) Katkı maddeli numuneler

CYME'den hazırlanan B20, B35, B50, B75 ve B100 yakıtlarının ölçülen CO<sub>2</sub> emisyonu değerleri, dizel yakıtın değerleriyle karşılaştırılmıştır. Ölçülen CO<sub>2</sub> emisyonu değerleri Tablo 5.29'da sunulmuştur. Biyodizel yakıtları, dizel yakıtının CO<sub>2</sub> emisyonu değerleriyle kıyaslandığında; B20 yakıtında % 1.5, B35 yakıtında % 2.1, B50 yakıtında % 4.4, B75 yakıtında % 4.8 ve B100 yakıtında % 8 oranında bir artış tespit edilmiştir.

Şekil 5.29(a)'dan, test yakıtlarının hepsinde motordaki yükün artmasıyla beraber CO<sub>2</sub> emisyon değerlerinde artış olduğu görülmektedir. Motordaki yükün artmasına paralel bir artış gösteren ÖYT ve egzoz çıkış sıcaklığı değerlerinin, CO<sub>2</sub> emisyonlarındaki artışa sebebiyet

verdiği düşünülmektedir. Tablo 5.29'deki veriler incelendiğinde, dizel yakıtının içerisindeki biyodizel oranının artmasıyla CO<sub>2</sub> emisyon değerleri artmıştır. Dizel yakıtına kıyasla biyodizelin yapısında daha fazla bulunan oksijenin, silindir içindeki yanma esnasında karbon atomu ile reaksiyona girerek CO<sub>2</sub> emisyonlarını oluşturduğu düşünülmektedir. Ayrıca Şekil 5.30(a)'da görüldüğü gibi yükün artmasıyla O<sub>2</sub> emisyonu değerlerinin düşmesi de bu durumu desteklemektedir.

B50 yakıtının CO<sub>2</sub> emisyonu değerleri de, B50+20Mn+PG, B50+40Mn+PG ve B50+60Mn+PG yakıtlarının CO<sub>2</sub> emisyonu değerleriyle karşılaştırılmıştır. Test yakıtlarının CO<sub>2</sub> emisyonu değerleri Tablo 5.29'da verilmiştir. Katkı ilaveli yakıtlar, B50 yakıtının CO<sub>2</sub> emisyonu değerleriyle kıyaslandığında; B50+20Mn+PG yakıtında % 2.9, B50+40Mn+PG yakıtında % 5.4, B50+60Mn+PG yakıtında % 8.1 oranında bir artış tespit edilmiştir.

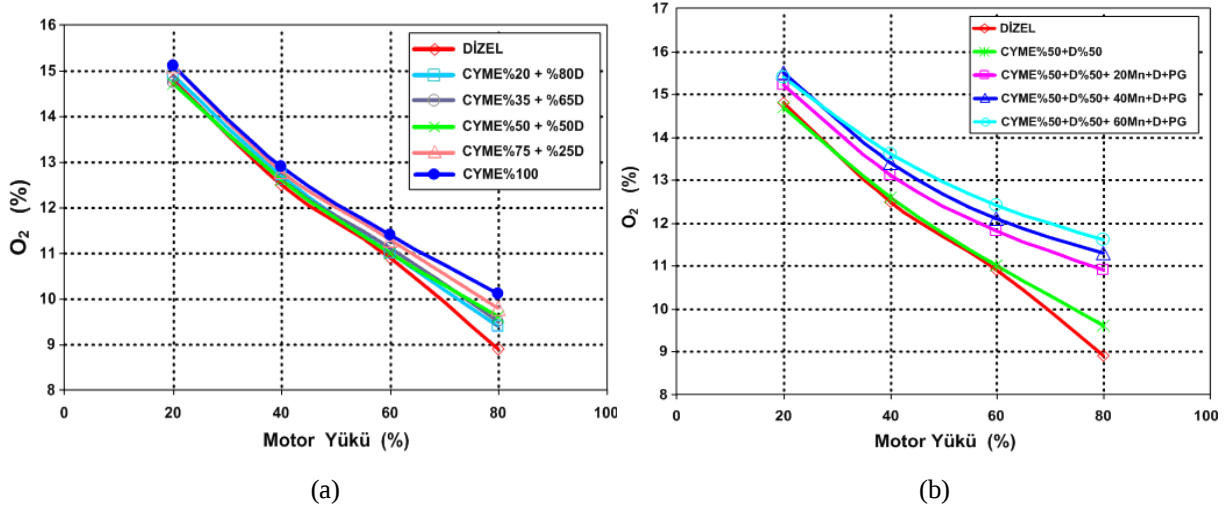
Şekil 5.29(b)'den görüldüğü gibi, katkı maddeleri, ilave edildikleri yakıtlarında CO<sub>2</sub> emisyon değerlerinin artışına sebep olmuştur. Katkı maddeleri, ilave edildikleri yakıtların oksijen içeriğini arttırmaktadır. Yanma reaksiyonu esnasında ortamda oksijen miktarının fazla olması, daha fazla karbon atomu oksitlenmesine ve bunun neticesinde de CO<sub>2</sub> emisyonlarının artmasına neden olduğu düşünülmektedir. Ayrıca katkı maddeleri, numunelerin setan sayısı, viskozite, yoğunluk ve parlama noktası gibi özellikleri iyileştirerek yanma verimine katkı sağlamaktadır [45,70-76]. İyi bir yanma reaksiyonunun oluşması, silindir içi sıcaklığı arttırırken beraberinde de CO<sub>2</sub> emisyon değerlerinin yükselmesine sebep olduğu düşünülmektedir.

#### **5.4.6. CYME Yakıt Numunelerinin Oksijen (O<sub>2</sub>) Emisyonları Analizi**

İçten yanmalı motorlarda enerji, hava-yakıt karışımının yanması sonucu elde edilmektedir. Hava ve yakıtın içerisinde bulunan oksijen motorda yanma reaksiyonu sonucunda oluşan bir emisyon ürünüdür.

**Tablo 5.30.** CYME yakıt türlerinin değişken yükteki O<sub>2</sub> değerleri

| Yakıt türü    | O <sub>2</sub> emisyonu (ppm) |      |      |      |
|---------------|-------------------------------|------|------|------|
|               | % 20                          | % 40 | % 60 | % 80 |
| DY            | 14,8                          | 12,5 | 10,9 | 8,9  |
| B20           | 14,9                          | 12,7 | 11   | 9,4  |
| B35           | 14,75                         | 12,6 | 11,1 | 9,5  |
| B50           | 14,7                          | 12,6 | 11   | 9,6  |
| B75           | 15,1                          | 12,8 | 11,3 | 9,8  |
| B100          | 15,1                          | 12,9 | 11,4 | 10,1 |
| B50+20Mn+D+PG | 15,2                          | 13,1 | 11,8 | 10,9 |
| B50+40Mn+D+PG | 15,5                          | 13,4 | 12,1 | 11,3 |
| B50+60Mn+D+PG | 15,4                          | 13,6 | 12,4 | 11,6 |



**Şekil 5.30.** CYME için hazırlanan yakıt türlerinin O<sub>2</sub> emisyonlarının değişimi;

(a) Biyodizel içerikli numuneler, (b) Katkı maddeli numuneler

CYME'den hazırlanan B20, B35, B50, B75 ve B100 yakıtlarının ölçülen O<sub>2</sub> emisyonu değerleri, dizel yakıtın değerleriyle karşılaştırılmıştır. Ölçülen numunelerinin O<sub>2</sub> emisyonu değerleri Tablo 5.30'da sunulmuştur. Biyodizel yakıtları, dizel yakıtının O<sub>2</sub> emisyonu değerleriyle kıyaslandığında; B20 yakıtında % 2, B35 yakıtında % 1.85, B50 yakıtında % 1.75, B75 yakıtında % 4 ve B100 yakıtında % 5.15 oranında bir artış tespit edilmiştir.

Tüm test yakıtları için motordaki yük arttıkça O<sub>2</sub> emisyonlarında azalma olduğu Şekil 5.30(a)'dan görülmektedir. Test yakıtlarının %20 yükte yüksek olan O<sub>2</sub> emisyonu değerleri yüklemenin artmasıyla ters orantılı olarak azalmıştır. %20 yükte silindir içi sıcaklığın düşük olması nedeniyle, oksijenin karbon atomu ile reaksiyon oluşturamadığı düşünülmektedir. %20 yükte karbon oksijen oksitlenmesi gerçekleşmemesi neticesinde, egzoz gazlarındaki O<sub>2</sub>

miktarının arttığı, CO<sub>2</sub> miktarının da azaldığı Şekil 5.29(a) ve Şekil 5.30(a)'dan görülmektedir. Dizel yakıt içerisindeki biyodizel oranının artmasıyla, O<sub>2</sub> emisyonları da aynı paralelde arttığı Şekil 5.30(a)'dan görülmektedir. Biyodizelin dizel yakıtına göre daha fazla oksijen içermesi, biyodizel yakıtlarında O<sub>2</sub> emisyonlarının yüksek çıkmasına sebep olduğu düşünülmektedir. Biyodizel kullanıldığında elde edilen CO emisyonlarının daha düşük olması bu düşüncüyü ayrıca desteklemektedir.

B50 yakıtının O<sub>2</sub> emisyonu değerleri de, B50+20+PG, B50+40Mn+PG ve B50+60Mn+PG yakıtlarının O<sub>2</sub> emisyonu değerleriyle karşılaştırılmıştır. Test yakıtlarının O<sub>2</sub> emisyonu değerleri Tablo 5.30'da sunulmuştur. Katkı ilaveli yakıtlar, B50 yakıtının O<sub>2</sub> emisyonu değerleriyle kıyaslandığında; B50+20Mn+PG yakıtında % 6.5, B50+40Mn+PG yakıtında % 9.2, B50+60Mn+PG yakıtında % 10.75 oranında bir artış tespit edilmiştir.

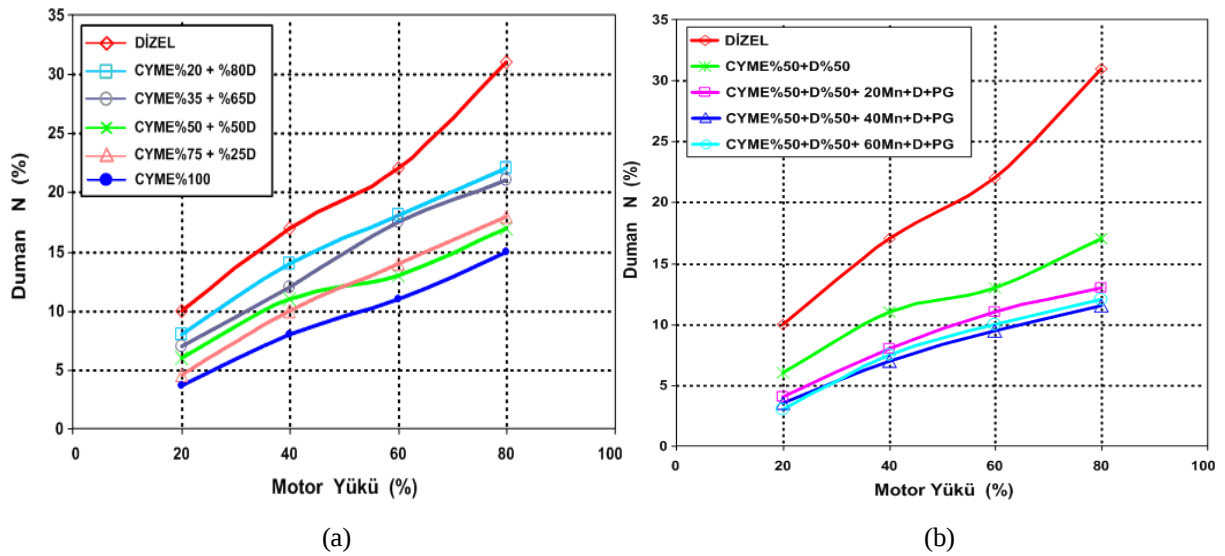
Şekil 5.30(b)'de görüldüğü gibi katkılı yakıt numunelerinde düşük yük şartlarında yüksek olan oksijen miktarı, yüklemenin artmasıyla orantılı olarak düşmüştür. Yükün artmasıyla beraber O<sub>2</sub> emisyon değerlerinin tüm test yakıtları için düşmesinin nedenini, %20 ile %80 yük değerleri arasında O<sub>2</sub> ile CO<sub>2</sub> emisyon değerlerinin ters orantılı olması şeklinde açıklanabilir. Şekil 5.29(b)'de ve Şekil 5.30(b)'de görüldüğü gibi, O<sub>2</sub> değerlerinin yüksek olduğu durumda CO<sub>2</sub> değerleri düşük, O<sub>2</sub> değerlerinin düşük olduğu durumda CO<sub>2</sub> değerleri yüksek olduğu görülmektedir. Şekil 5.30(b)'den görüldüğü gibi, katkı maddelerinin ilavesi ile O<sub>2</sub> emisyonu değerlerinde artış olmuştur. Bu artışın, gerek biyodizel yakıtındaki gerekse katkı maddelerindeki oksijen içeriğinin fazla olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Katkı maddelerinin %20 yük durumundan itibaren, O<sub>2</sub> emisyon değerlerinde farklılığa sebebiyet verdiği Şekil 5.30(b)'den görülmektedir. Her ne kadar karbon atomu oksitlemesi sonucu CO<sub>2</sub>'ye dönüşüm olsa da katkı ilaveli yakıtlardaki oksijen miktarının fazla olması bazı oksijen gazlarının karbon atomu ile bağ kuramamasına sebep olduğu düşünülmektedir. Katkılı numunelerin içeriğindeki oksijen miktarının, B50 yakıtı ile katkı ilaveli yakıtların O<sub>2</sub> emisyon değerleri arasındaki farklılığı oluşturduğu düşünülmektedir.

#### **5.4.7. CYME İçerikli Yakıt Numunelerinin Duman (İs) Emisyonları Analizi**

Alev içerisindeki türbülanslı karışım alanları ve Sıcaklık is oluşumunu etkileyen önemli parametrelerdir. Bölgesel sıcaklık değişimi ve oksijen konsantrasyonu dağılımı is oluşum mekanizmasının temel fiziksel büyüklükleridir. Bununla beraber yakıtın yüksek oksijen içeriği, düşük C/H oranı ve aromatik bileşenlerin olmaması duman oluşumunda önemli bir etkiye sahiptir [76].

**Tablo 5.31.** CYME için hazırlanan yakıt türlerinin değişken yükteki duman emisyon değerleri

| Yakıt türü    | Duman emisyonu (%) |      |      |      |
|---------------|--------------------|------|------|------|
|               | % 20               | % 40 | % 60 | % 80 |
| DY            | 10                 | 17   | 22   | 31   |
| B20           | 8                  | 14   | 18   | 22   |
| B35           | 7                  | 12   | 17,5 | 21   |
| B50           | 6                  | 11   | 13   | 17   |
| B75           | 4,5                | 10   | 14   | 17,9 |
| B100          | 3,7                | 8    | 11   | 15   |
| B50+20Mn+D+PG | 4                  | 8    | 11   | 13   |
| B50+40Mn+D+PG | 3,5                | 7    | 9,5  | 11,5 |
| B50+60Mn+D+PG | 3                  | 7,5  | 10   | 12   |



**Şekil 5.31.** CYME için hazırlanan yakıt türlerinin duman emisyonlarının değişimi;

(a) Biyodizel içerikli numuneler, (b) Katkı maddeli numuneler

CYME'den hazırlanan B20, B35, B50, B75 ve B100 yakıtlarının ölçülen duman emisyon değerleri, dizel yakıtın değerleriyle karşılaştırılmıştır. Ölçülen duman emisyonu değerleri Tablo 5.31'de sunulmuştur. Biyodizel yakıtları, dizel yakıtının duman emisyon değerleriyle kıyaslandığında; B20 yakıtında % 22,5, B35 yakıtında % 28,5, B50 yakıtında % 41,4, B75 yakıtında % 41,8 ve B100 yakıtında % 53 oranında bir azalma tespit edilmiştir.

Biyodizel kullanıldığında duman emisyonu değerlerinin dizel yakıtına göre düşük çıkmasının temel nedeni, biyodizelin oksijen bakımından zengin bir yapıya sahip olması

olarak açıklanabilir. Ayrıca dizel yakıtına kıyasla daha düşük karbon atomu içeren biyodizel, yapısındaki oksijenden dolayı yanma sırasında oksitlenme miktarını arttırarak, duman emisyonlarının oluşumunu azalttığı düşünülmektedir. Nitekim; dizel yakıt içerisindeki biyodizel oranının artmasıyla duman emisyonlarının azaldığı Şekil 5.31(a)'da görülmektedir.

Biyodizelin oksijen içeriğinden dolayı, duman emisyonlarında önemli bir düşüş sağlandığı belirtilmiştir [77]. Ayrıca karbon içeriğinin düşük olmasından dolayı duman emisyonlarının azaldığı da belirtilmiştir. Oksijen içerikli yakıtlar silindir içi sıcaklığı arttırmaktadır. Bu artışın yanma verimini olumlu etkileyerek bölgesel sıcaklık değişimini önlediği düşünülmektedir. Bölgesel sıcaklık değişimi ve oksijen konsantrasyonu dağılımı is oluşumunu tetikleyen temel mekanizmalardır. [76].

B50 yakıtının duman emisyon değerleri de, B50+20Mn+PG, B50+40Mn+PG ve B50+60Mn+PG yakıtlarının duman emisyon değerleriyle karşılaştırılmıştır. Test yakıtlarının duman emisyonu değerleri Tablo 5.31'de sunulmuştur. Katkı ilaveli yakıtlar, B50 yakıtının duman emisyon değerleriyle kıyaslandığında; B50+20Mn+PG yakıtında % 23.4, B50+40Mn+PG yakıtında % 33, B50+60Mn+PG yakıtında % 30.8 oranında bir azalma tespit edilmiştir.

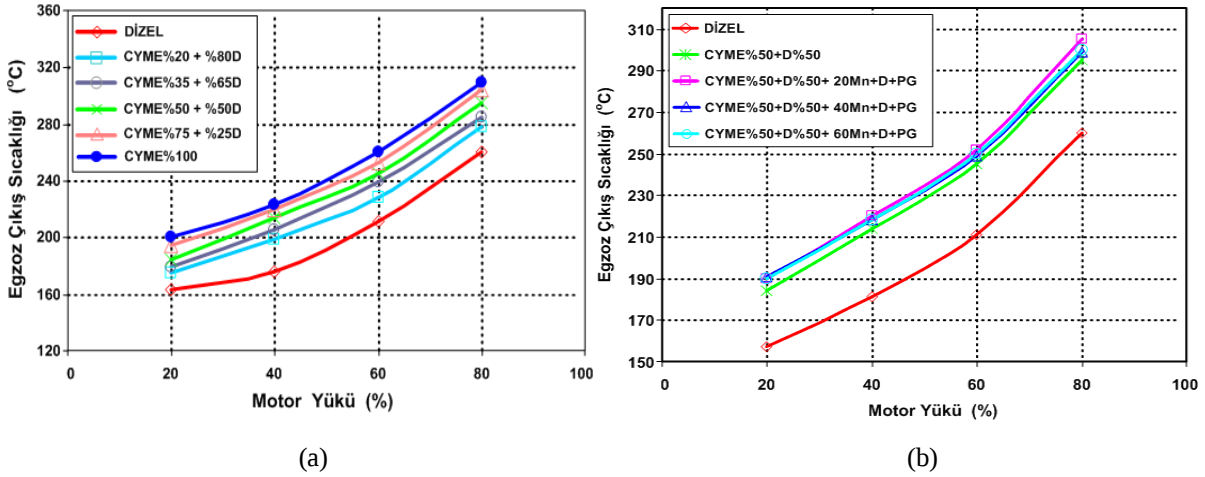
Şekil 5.31(b)'den görüldüğü gibi, katkı maddelerinin ilavesi ile duman emisyonu değerlerinde azalma olmuştur. Kullanılan katkı maddelerinin oksijen oranı biyodizel yakıtlarına kıyasla daha fazladır. B50 yakıtının Mn, propilen glikol ve dodekanol gibi katkı maddeleriyle desteklenmesi karbon oranını düşürüp oksijen oranı arttırmaktadır. Oksijen miktarının artması, yanma sırasında oksitlenme reaksiyonu hızlandırarak duman oluşumu azalttığı düşünülmektedir. Ayrıca yakıtı ilave edilen katkı maddeleri yanma reaksiyonuna istikrarlı bir yapı kazandırıp, alev içerisinde türbülanslı karışım alanları ve duman emisyonları oluşumlarını engellediği düşünülmektedir.

#### **5.4.8. CYME İçerikli Yakıt Numunelerinin Egzoz Gazları Sıcaklık Analizi**

İçten yanmalı motorlarda silindir içerisinde yakıtın yanması sonucu elde edilen ısı enerjisinin bir kısmı soğutma, egzoz ve sürtünme yolu ile kaybedilmektedir. Kaybedilen bu enerji kayıplar neticesinde geriye kalan ısı enerjisi mekanik enerjiye dönüştürülerek motordaki güç elde edilmektedir.

**Tablo 5.32.** CYME için hazırlanan yakıt türlerinin değişken yükteki egzoz çıkış sıcaklığı değerleri

| Yakıt türü    | Egzoz çıkış sıcaklığı (°C) |      |      |      |
|---------------|----------------------------|------|------|------|
|               | % 20                       | % 40 | % 60 | % 80 |
| DY            | 163                        | 176  | 211  | 260  |
| B20           | 175                        | 199  | 228  | 278  |
| B35           | 179                        | 205  | 239  | 285  |
| B50           | 184                        | 214  | 245  | 295  |
| B75           | 194                        | 220  | 253  | 304  |
| B100          | 200                        | 223  | 260  | 309  |
| B50+20Mn+D+PG | 190                        | 220  | 252  | 305  |
| B50+40Mn+D+PG | 191                        | 218  | 249  | 299  |
| B50+60Mn+D+PG | 190                        | 218  | 250  | 300  |



**Şekil 5.32.** CYME için hazırlanan yakıt türlerinin egzoz çıkış sıcaklığı değişimi;

(a) Biyodizel içerikli numuneler, (b) Katkı maddeli numuneler

CYME'den hazırlanan B20, B35, B50, B75 ve B100 yakıtlarının ölçülen egzoz çıkış sıcaklığı değerleri, dizel yakıtın değerleriyle karşılaştırılmıştır. Ölçülen egzoz çıkış sıcaklığı değerleri Tablo 5.32'de sunulmuştur. Biyodizel yakıtları, dizel yakıtının egzoz çıkış sıcaklığı değerleriyle kıyaslandığında; B20 yakıtında % 9, B35 yakıtında % 12.4, B50 yakıtında % 15.9, B75 yakıtında % 20.1 ve B100 yakıtında % 22.9 oranında bir artış tespit edilmiştir.

Şekil 5.32(a)'dan görüldüğü gibi, motordaki yükün artmasıyla beraber test yakıtlarının egzoz çıkış sıcaklıkları artmıştır. Motorda üretilmesi gereken gücü arttırabilmek için daha fazla ısı enerjisine ihtiyaç duyulmaktadır. Yanma odasındaki ısı enerjisinin yüksek olması, egzoz çıkış sıcaklığının yüksek olmasına sebep olduğu düşünülmektedir. Motorda biyodizel yakıtının kullanılmasıyla egzoz çıkış sıcaklığının arttığı Şekil 5.32(a)'dan görülmektedir.

Dizel yakıtı ile biyodizel yakıtının egzoz çıkış sıcaklığı değerlerindeki farklılığa, biyodizel yakıtının oksijen içeriği ve setan sayısının yüksek olması gibi özelliklerden kaynaklandığı düşünülmektedir. Test yakıtlarının, içeriğindeki oksijen nispetinde iyi bir yanma performansı sergileyerek, farklı değerlerde egzoz çıkış sıcaklığı oluşturduğu düşünülmektedir. Ayrıca biyodizelin sahip olduğu yüksek viskozite ve setan sayısından dolayı daha yavaş ve uzun bir yanmanın gerçekleşiyor olması biyodizel kullanımında daha yüksek egzoz sıcaklığının oluşmasına sebep olarak gösterilebilir. Dizel motorlarda yakıt olarak biyodizel kullanıldığında yanmanın daha uzun devam etmesinden dolayı egzoz sıcaklığının daha yüksek çıktığını belirtmiştir [78]. Egzoz gazı sıcaklığının tutuşma gecikmesinden etkilendiğini ve biyodizelin setan sayısının yüksek olmasından dolayı daha düşük tutuşma gecikmesi periyodu sergilediğini ve bunun da biyodizel kullanıldığında egzoz gazı sıcaklığını artırdığını belirtmiştir [13].

B50 yakıtının egzoz çıkış sıcaklığı değerleri de, B50+20Mn+PG, B50+40Mn+PG ve B50+60Mn+PG yakıtlarının egzoz çıkış sıcaklığı değerleriyle karşılaştırılmıştır. Test yakıtlarının egzoz çıkış sıcaklığı değerleri Tablo 5.32'de sunulmuştur. Katkı ilaveli yakıtlar, B50 yakıtının egzoz çıkış sıcaklığı değerleriyle kıyaslandığında; B50+20Mn+PG yakıtında % 3.2, B50+40Mn+PG yakıtında % 2.2, B50+60Mn+PG yakıtında % 2.25 oranında bir artış tespit edilmiştir.

Şekil 5.32(b)'den görüldüğü gibi, B50 yakıtına ilave edilen Mn, dodekanol ve propilen glikol gibi katkı maddeleri egzoz çıkış sıcaklık değerlerini arttırmıştır. Katkı maddeleri yakıtın setan sayısını ve oksijen içeriğini arttırdığı ve neticesinde de iyi bir yanma karakteristiğinin oluşmasına katkı sağladığı düşünülmektedir. Yüksek setan sayısı daha düşük tutuşma gecikmesi periyodu oluşturduğundan egzoz gazı sıcaklığı artmaktadır. Yakıtın kimyasal bağ yapısındaki oksijen miktarının artması, yakıtlara olumlu bir yanma performansı kazandırarak, egzoz çıkış sıcaklığını arttırmaktadır[13,78].

## 5.5. AAYME İçin Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Atık ayçiçeği yağından elde edilen biyodizeller (AAYME), belli oranlarda dizel yakıt ile karıştırılarak beş farklı yakıt numunesi elde edilmiştir. Ayrıca B50 yakıtına değişik özellikteki katkı maddeleri ilave edilerek, numunelerin ÖYT ve egzoz emisyon değerleri test edilmiştir. Test işleminin sonunda elde edilen değerler karşılaştırmalı bir şekilde aşağıda sunulmuştur.

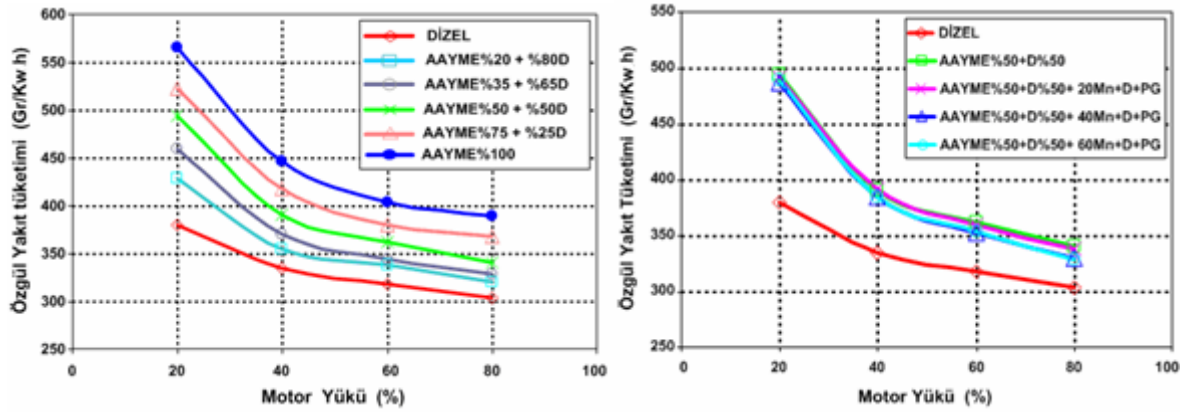
### 5.5.1. AAYME İçerikli Yakıt Numunelerinin Özgül Yakıt Tüketimi Analizi

Özgül yakıt tüketimi, birim güç başına tüketilen kütsel yakıt miktarı olarak tanımlanmaktadır.

Bu çalışmada, sabit yükte, devir değişimine bağlı özgül yakıt tüketimi (ÖYT) ölçümü yerine, sabit hızda, yük değişimine bağlı ÖYT ölçümü gerçekleştirilmiştir. Test motoru, 1500 dev/dak.'lık sabit hızda, %20, %40, %60 ve %80 değişken yük şartlarında çalıştırılarak ÖYT değerleri ölçülmüştür. Motor devri, motor test düzeneğinde bulunan elektronik hız kontrol ünitesiyle sabit tutulmuştur. Elektronik hız kontrol ünitesi, motor devrini sabit tutmak için, yükün artışına bağlı olarak tüketilecek yakıtın miktarını otomatik olarak arttırmaktadır.

**Tablo 5.33.** AAYME yakıt türlerinin değişken yükteki ÖYT değerleri

| Yakıt türü    | ÖYT değeri (gr/kW.h) |      |      |      |
|---------------|----------------------|------|------|------|
|               | % 20                 | % 40 | % 60 | % 80 |
| DY            | 380                  | 334  | 318  | 303  |
| B20           | 428                  | 355  | 338  | 320  |
| B35           | 459                  | 370  | 344  | 329  |
| B50           | 494                  | 391  | 362  | 341  |
| B75           | 523                  | 418  | 380  | 368  |
| B100          | 566                  | 447  | 404  | 389  |
| B50+20Mn+D+PG | 492                  | 392  | 360  | 338  |
| B50+40Mn+D+PG | 487                  | 385  | 352  | 330  |
| B50+60Mn+D+PG | 489                  | 384  | 353  | 329  |



(a) (b)

**Şekil 5.33.** AAYME için hazırlanan yakıt türlerinin ÖYT emisyonlarının değişimi;  
(a) Biyodizel içerikli numuneler, (b) Katkı maddeli numuneler

1500 dev/dak.'lık sabit hızda, %20, %40, %60 ve %80 değişken yük şartlarında çalıştırılarak ÖYT ölçülmüştür. AAYME'den hazırlanan B20, B35, B50, B75 ve B100 yakıtlarının motor performans testlerinden ölçülen ÖYT değerleri, dizel yakıtın değerleriyle karşılaştırılmıştır. Ölçülen ÖYT değerleri Tablo 5.33'de sunulmuştur. Biyodizel yakıtları, dizel yakıtının ÖYT değerleriyle kıyaslandığında; B20 yakıtında % 8.15, B35 yakıtında % 12.8, B50 yakıtında % 19.4, B75 yakıtında % 27 ve B100 yakıtında % 35.5 oranında bir artış tespit edilmiştir.

Şekil 5.33(a)'da görüldüğü gibi Tüm yakıt türleri arasında en düşük özgül yakıt tüketiminin dizel yakıtı kullanıldığında, en yüksek özgül yakıt tüketiminin de B100 kullanıldığında elde edilmiştir. Test yakıtlarının ÖYT değerleri, dizel yakıtı içerisindeki biyodizel miktarının artmasıyla orantılı bir şekilde artmaktadır. Biyodizel yakıtının; ısı değeri düşük, viskozite ve yoğunluk değerlerinin yüksek olması, ÖYT değerlerinin yüksek değerde çıkmasına sebep olduğu düşünülmektedir. Şekil 5.33(a)'da görüldüğü gibi, aynı yük şartlarında test edilen dizel ve biyodizel yakıtları aynı gücü üretmelerine rağmen biyodizel yakıtının ÖYT değeri dizel yakıtına kıyasla daha yüksektir. Belirtilen bu durum üç nedene bağlanmıştır. Birinci neden, formüsel olarak da hesaplanabileceği üzere, birbirleri arasındaki yoğunluk farkıdır. Çünkü enjeksiyon pompası yakıtları hacimsel olarak ölçerek silindirlere göndermektedir. Biyodizelin yoğunluğunun dizel yakıtına göre yüksek olmasından dolayı kütleli yakıt tüketimi, biyodizel yakıtlarında yüksek değerde çıkmaktadır. Diğer bir deyişle, yoğunluğu yüksek olan yakıt numunesinin silindirlere gönderilen gram cinsinden değeri fazladır. Yoğunluğu yüksek değerde olan yakıt numunelerinde ÖYT değerlerinin yüksek çıkması kaçınılmaz bir sonuçtur. İkinci neden ise; test yakıtları arasındaki viskozite

farklılığıdır. Yüksek viskoziteye sahip yakıtlar aynı enjektör basıncıyla ve aynı enjektör memesinin delik çapından püskürtüldüğünde daha iri taneli olarak yanma odasına giriş yapmaktadır. Bu durumda yakıt molekülleri, sıkıştırılmış hava ile iyi bir karışım gerçekleştiremeyecektir. Sonuç olarak, yakıtın buharlaşma ve yanma verimi olumsuz etkilenecektir. Bu durum harcanan yakıt miktarını arttıracığından, ÖYT değerlerini de o oranda yükselecektir [24,59]. ÖYT'yi etkileyen faktörlerden bir diğeri ise yakıtın ısıl değeridir. Her yakıt numunesi için aynı yük şartlarında test yapıldığında, yanma reaksiyonunun sonunda aynı ısıl enerji elde edilmesi gerekir. Eşit ısı enerjisi sağlayabilmek için, dizel yakıtına kıyasla biyodizel yakıtından kütsel olarak daha fazla yanma odasına alınması gerekir. Ancak bu şartlarda yakıtlar arası enerji eşdeğerliği sağlanmış olabilir. Bu durum ise, biyodizel yakıtlarında daha fazla yakıt tüketimine sebep olmaktadır. Sonuç olarak, püskürtülen yakıtın; yoğunluğu, viskozitesi ve ısıl değeri ÖYT doğrudan etkileyen unsurlardır [12,56,60,61].

B50 yakıtının ÖYT değeri de, katkı ilaveli yakıtlarının ÖYT değerleriyle karşılaştırılmıştır. Test yakıtlarının ÖYT değeri Tablo 5.33'de sunulmuştur. Katkı ilaveli yakıtlar, B50 yakıtının çalışma değerleriyle kıyaslandığında; B50+20Mn $\mu$ mol/lit+PG yakıtında % 0.5, B50+40Mn $\mu$ mol/lit +PG yakıtında % 2.2, B50+60Mn $\mu$ mol/lit+PG yakıtında % 2.15 oranında bir azalma tespit edilmiştir.

Katkı maddelerin, ilave edildikleri yakıtların ÖYT değerlerinin azalmasına katkı sağladığı Şekil 5.33(b)'den görülmektedir. Katkı maddelerinin yakıt numunelerinde; setan sayısı, viskozite, yoğunluk ve parlama noktası gibi özellikleri iyileştirmesinin ve ayrıca yanma reaksiyonunda katalizör olarak görev yapmasının, neticesinde ÖYT değerlerinin azaldığı düşünülmektedir. Ayrıca, B50 yakıtına ilave edilen Mn bazlı katkı maddesi miktarlarının artışına bağlı olarak ÖYT değerinin daha da azaldığı Şekil 5.33(b)'den görülmektedir. Metal bazlı katkı maddesinin yakıtı ilave edilmesinin; setan sayısı, viskozite ve parlama noktası gibi özelliklere olumlu yönde katkı sağladığı belirtilmiştir [24-27]. Fakat metal bazlı katkı maddelerinin yakıtı ilave edilme oranının bir optimum değerinin olduğu, bu değer üzerine çıkıldığında ise, setan sayısı, yoğunluk, viskozite ve parlama noktası gibi özelliklerinin olumsuz bir şekilde etkilendiği de ayrıca belirtilmiştir [27]. ÜÇYME'den hazırlanan B50 yakıtına, 20,40 ve 60  $\mu$ mol/lit ölçeğinde Mn dozlaması yapılmıştır. Belirtilen bu ölçekler arasında, en iyi performansın 40  $\mu$ mol/lit ölçeğindeki Mn kullanımında gerçekleştiği Şekil 5.33(b)'den görülmektedir. Her ne kadar biyodizel yakıtlarının karbon, hidrojen ve oksijen oranları birbirlerine benzer değerlerde olsa da, Tablo 3.1'deki yağ asit kompozisyonu değerlerinden görüldüğü gibi kimyasal bağ yapıları birbirlerinden farklıdır. Bu

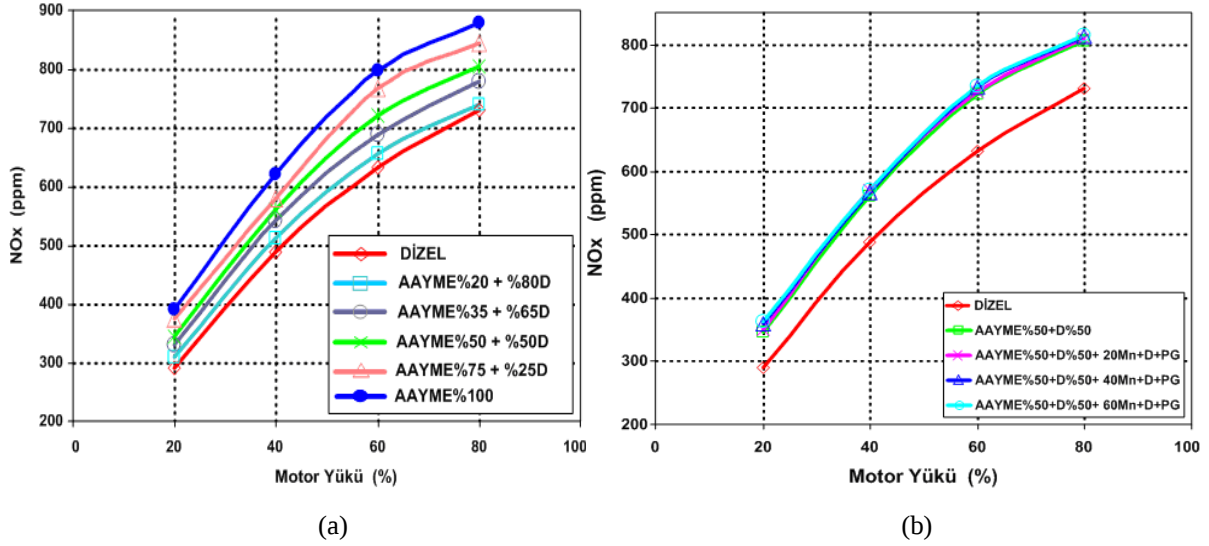
sebeple, Mn bazlı katkı maddesinin en uygun dozlama miktarının değişken değerlerde olması beklenen bir durumdur. Yapılan motor testleri neticesinde, Mn bazlı katkı maddesinin yakıtta ilave edilme oranındaki optimum değer 40 µmol/lt olduğu Şekil 5.33(b)'den görülmektedir.

### 5.5.2. AAYME İçerikli Yakıt Numunelerinin NO<sub>x</sub> Emisyonları Analizi

NO<sub>x</sub>'ler genellikle, motorun yüksek sıcaklıklardaki çalışma şartlarında oluşmaktadır. NO<sub>x</sub> terimi NO ve NO<sub>2</sub>'nin atmosferdeki toplam yoğunluğunun ifadesidir. Dizel motorlar yanma reaksiyonunu oluştururken diğer motor tiplerine göre daha fazla hava kullanmaktadır. Kullanılan havanın içeriğindeki oksijen, aşırı sıcak çalışma şartlarında ve yanma için yeterli zaman oluştuğunda, azot ile reaksiyona girer. Bu reaksiyon sonucunda NO<sub>x</sub> emisyonları oluşur. NO<sub>x</sub> genellikle, kontrolsüz yanma aşamasında meydana gelmektedir. Biyodizelin oksijen içeriği nedeniyle dizel yakıtla kıyasla daha yüksek NO<sub>x</sub> salınımına sebebiyet vereceği belirtilmiştir. Biyodizel ile çalışan motorlarda silindir içi basıncın ve sıcaklık değerlerinin yüksek oluşu, NO<sub>x</sub> emisyonu oluşmasına neden olarak gösterilmiştir [62-64]. NO<sub>x</sub> oluşumu büyük oranda silindir içi sıcaklığa, basınca, tutuşma gecikmesi ve yanma süresine bağlıdır [65-67].

**Tablo 5.34.** AAYME yakıt türlerinin değişken yükteki NO<sub>x</sub> değerleri

| Yakıt Türü    | NO <sub>x</sub> Emisyonu (ppm) |      |      |      |
|---------------|--------------------------------|------|------|------|
|               | % 20                           | % 40 | % 60 | % 80 |
| DY            | 290                            | 488  | 632  | 731  |
| B20           | 310                            | 512  | 655  | 740  |
| B35           | 330                            | 543  | 689  | 778  |
| B50           | 345                            | 560  | 721  | 805  |
| B75           | 374                            | 580  | 768  | 845  |
| B100          | 390                            | 620  | 798  | 878  |
| B50+20Mn+D+PG | 350                            | 570  | 725  | 808  |
| B50+40Mn+D+PG | 358                            | 566  | 733  | 812  |
| B50+60Mn+D+PG | 363                            | 569  | 735  | 814  |



Şekil 5.34. AAYME için hazırlanan yakıt türlerinin NO<sub>x</sub> emisyonlarının değişimi;  
(a) Biyodizel içerikli numuneler, (b) Katkı maddeli numuneler

AAYME'den hazırlanan B20, B35, B50, B75 ve B100 yakıtlarının NO<sub>x</sub> emisyonu değerleri, dizel yakıtın değerleriyle karşılaştırılmıştır. Ölçülen NO<sub>x</sub> emisyonu değerleri Tablo 5.34'de sunulmuştur. Biyodizel yakıtları, dizel yakıtının NO<sub>x</sub> emisyonu değerleriyle kıyaslandığında; B20 yakıtında % 3.7, B35 yakıtında % 9.5, B50 yakıtında % 13.6, B75 yakıtında % 19.9 ve B100 yakıtında % 25.5 oranında bir artış tespit edilmiştir.

Şekil 5.34(a)'da görüldüğü gibi, düşük yüklerde silindir içi sıcaklığının düşük olması, bütün test yakıtları için NO<sub>x</sub> emisyonunun düşük çıkmasına neden olmuştur. Motordaki yükün artışı ile NO<sub>x</sub> emisyonlarında da aynı paralelde bir artış gözlemlenmiştir. Yükün artmasıyla beraber NO<sub>x</sub> emisyon değerlerindeki bu artış; silindir içi sıcaklığın artması ve daha fazla yakıt tüketimi gibi sebeplere bağlanmıştır. Şekil 5.40(a)'daki egzoz çıkış sıcaklık değerleri ve Şekil 5.33(a)'daki ÖYT değerleri de bu durumu desteklemektedir. Silindir içi sıcaklığın artması, silindir içi hava hareketliliğini oluşturarak NO<sub>x</sub> emisyonlarının oluşumuna zemin hazırlamaktadır [64]. Fakat dizel yakıtı içerisindeki biyodizel oranının artmasıyla sıcaklık değerleri daha da yükselmekte, bu yükselmenin neticesinde ise; basınç, hava hareketliliği gibi oluşumların daha hızlı gerçekleştiği düşünülmektedir. Aynı yük şartlarında NO<sub>x</sub> emisyonu değerleri arasındaki farklılığın bir diğer nedeni ise, yakıt numunelerin ısı değerleri arasındaki farklılıktan kaynaklandığı düşünülmektedir. Biyodizel yakıtlarının, aynı enerjiyi elde edebilmeleri için kütsel olarak daha fazla kullanılması gerekir. Gram cinsinden daha fazla yakıtın kullanılması, NO<sub>x</sub> emisyonlarının artmasına sebep olarak gösterilebilir.

B50 yakıtının NO<sub>x</sub> emisyonu değerleri de, B50+20Mn+PG, B50+40Mn+PG ve B50+60Mn+PG yakıtlarının NO<sub>x</sub> emisyonu değerleriyle karşılaştırılmıştır. Test yakıtlarının

NO<sub>x</sub> emisyonu değerleri Tablo 5.34’de sunulmuştur. Katkı ilaveli yakıtlar, B50 yakıtının NO<sub>x</sub> emisyonu değerleriyle kıyaslandığında; B50+20Mn+PG yakıtında % 1, B50+40Mn+PG yakıtında % 1.7, B50+60Mn+PG yakıtında % 2.2 oranında bir artış tespit edilmiştir.

Katkı maddelerinin yapısında oksijen bulunması ve egzoz çıkış sıcaklık değerlerinin yüksek olması sebebiyle, NO<sub>x</sub> emisyonlarının daha yüksek olması beklenmektedir. Ancak beklenenin tersine NO<sub>x</sub> emisyonu değerlerinde bir düşüş olduğu Şekil 5.34(b)’den görölmektedir. Yakıt numunelerine katkı maddelerinin ilave edilmesiyle, setan sayısının artması, ÖYT değerlerinin ve parlama noktasının düşmesi gibi sebeplerin neticesinde NO<sub>x</sub> emisyonlarının azalttığı düşünölmektedir. Nitekim hayvansal iç yağı metil esteri ve karışımlarının kullanıldığı bir çalışmada, özgül yakıt tüketimi ve egzoz çıkış sıcaklığı değerlerinin dizel yakıtına göre yüksek olmasına rağmen daha düşük NO<sub>x</sub> emisyonları elde edilmiştir. Yakıt numunelerinin dizel yakıtına göre yüksek setan sayısına ve daha düşük parlama noktasına sahip olması ile açıklanmıştır. Setan sayısının artması ile NO<sub>x</sub> emisyonlarının azaldığı da ayrıca vurgulanmıştır.[68]. Katkı maddeleri, tutuşma gecikmesini önleyerek azot ile oksijenin reaksiyona gireceği süreyi kısalttığı düşünölmektedir. Katkı numunelerdeki yanma sürenin kısılması, NO<sub>x</sub> oluşumunun azalmasına sebep olarak gösterilebilir.

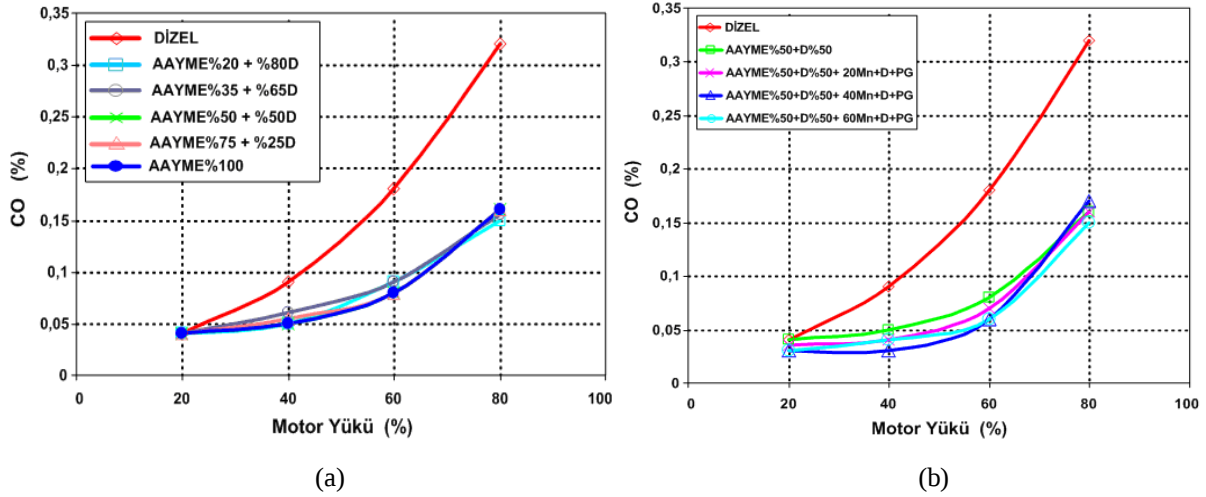
Biyodizel yakıtlarının viskozitelerinin ve parlama noktalarının yüksek olması, tutuşma gecikmesine sebep olmakta, neticesinde azot ile oksijenin reaksiyona girebileceği zaman diliminin oluşturmaktadır [63].

### **5.5.3. AAYME İçerikli Yakıt Numunelerinin Karbon monoksit (CO) Emisyonları Analizi**

CO emisyonlarının oluşumu dizel motorlarda birçok nedene bağlanabilir. Gaz sıcaklığının düşük olması, yeterli oksijenin bulunmaması ve CO<sub>2</sub>’ye dönüşüm için yeterli zamanın kalmamasından dolayı yanmanın tamamlanmamış olması CO miktarını artırır[69]. Biyodizel yakıtının oksijen içermesi, düşük karbon oranı ve yüksek setan sayısı CO emisyonlarındaki azalmanın temel sebepleridir [45, 70-76].

**Tablo 5.35.** AAYME için hazırlanan yakıt türlerinin değişken yükteki CO değerleri

| Yakıt türü    | CO emisyonu (%) |       |      |       |
|---------------|-----------------|-------|------|-------|
|               | % 20            | % 40  | % 60 | % 80  |
| DY            | 0,04            | 0,09  | 0,18 | 0,32  |
| B20           | 0,04            | 0,05  | 0,09 | 0,15  |
| B35           | 0,04            | 0,06  | 0,09 | 0,155 |
| B50           | 0,04            | 0,05  | 0,08 | 0,16  |
| B75           | 0,04            | 0,055 | 0,08 | 0,16  |
| B100          | 0,04            | 0,05  | 0,08 | 0,16  |
| B50+20Mn+D+PG | 0,035           | 0,04  | 0,07 | 0,16  |
| B50+40Mn+D+PG | 0,03            | 0,03  | 0,06 | 0,17  |
| B50+60Mn+D+PG | 0,03            | 0,04  | 0,06 | 0,15  |



**Şekil 5.35.** AAYME için hazırlanan yakıt türlerinin CO emisyonlarının değişimi;

(a) Biyodizel içerikli numuneler, (b) Katkı maddeli numuneler

AAYME'den hazırlanan B20, B35, B50, B75 ve B100 yakıtlarının ölçülen CO emisyonu değerleri, dizel yakıtın değerleriyle karşılaştırılmıştır. Ölçülen CO emisyonu değerleri Tablo 5.35'de sunulmuştur. Biyodizel yakıtları, dizel yakıtının CO emisyonu değerleriyle kıyaslandığında; B20 yakıtında % 48, B35 yakıtında % 45, B50 yakıtında % 47.5, B75 yakıtında % 47 ve B100 yakıtında % 47.5 oranında bir azalma tespit edilmiştir.

Tüm test yakıtları için motordaki yük arttıkça CO emisyonlarının da aynı paralelde arttığı Şekil 5.35(a)'dan görülmektedir. Yükün artmasıyla beraber CO emisyonlarındaki bu artış, kütleli olarak daha fazla yakıt kullanılmasına bağlanmıştır. Yükün artmasıyla beraber gram cinsinden daha fazla yakıt kullanılması CO emisyonlarının artışına sebep olarak gösterilebilir. Biyodizel yakıtlarının CO emisyonlarının, dizel yakıtına göre daha düşük

değerlerde olduğu Şekil 5.35(a)'da görülmektedir. Biyodizel yakıtının setan sayısının yüksek olması ve kimyasal bağ yapısında oksijen bulundurması biyodizel yakıtlarının CO emisyonu değerlerindeki azalmaya sebep olduğu düşünülmektedir. Test yakıtlarının CO emisyon değerleri %20 yükte benzer değerde iken, %40, %60, %80 yük şartlarında, yakıtların CO emisyon değerleri arasında belirgin farklılıklar olduğu Şekil 5.35(a)'dan görülmektedir. Dizel yakıtı içerisindeki biyodizel oranının arttırılmasıyla, setan sayısı ve oksijen içeriği gibi değerlerin arttığı ve bu durumun ise test yakıtları arasındaki CO emisyonlarının farklı değerlerde oluşmasına sebep olduğu düşünülmektedir. Yakıtların yanma performansını etkileyecek özellikleri ne kadar iyi olursa, CO emisyon değerlerinin de o nispette düşük olacağı düşünülmektedir.

B50 yakıtının CO emisyonu değerleri de, B50+20Mn+PG, B50+40Mn+PG ve B50+60Mn+PG yakıtlarının CO emisyonu değerleriyle karşılaştırılmıştır. Test yakıtlarının CO emisyonu değerleri Tablo 5.35'de sunulmuştur. Katkı ilaveli yakıtlar, B50 yakıtının CO emisyonu değerleriyle kıyaslandığında; B50+20Mn+PG yakıtında % 7, B50+40Mn+PG yakıtında % 12, B50+60Mn+PG yakıtında % 15 oranında bir azalma tespit edilmiştir.

Katkı ilaveli yakıtların CO emisyonu değerleri B50 yakıtına göre daha düşük olduğu Şekil 5.35(b)'de görülmektedir. Katkı maddeleri, ilave edildikleri yakıtın; setan sayısı, parlama noktası, viskozite ve yoğunluk gibi özelliklerini iyileştirmesiyle, B50 yakıtına göre daha iyi bir yanma performansı sağladığı düşünülmektedir [45, 66, 69–74]. Şekil 5.35(b)'de görüldüğü gibi, yakıtta Mn ilavesi miktarının artırılmasıyla, CO emisyon değerleri düşmüştür. Mn bazlı katkı maddesinin, yakıtların yanma performansını etkileyecek özelliklerini iyileştirmektedir [70]. Yanma performansının iyileşmesi, CO emisyonunun CO<sub>2</sub>'ye dönüşümü için zaman kazandırdığı düşünülmektedir. Katkı ilaveli numunelerin CO<sub>2</sub> emisyonlarının B50 yakıtına göre yüksek çıkması, belirtilen bu durumu desteklemektedir.

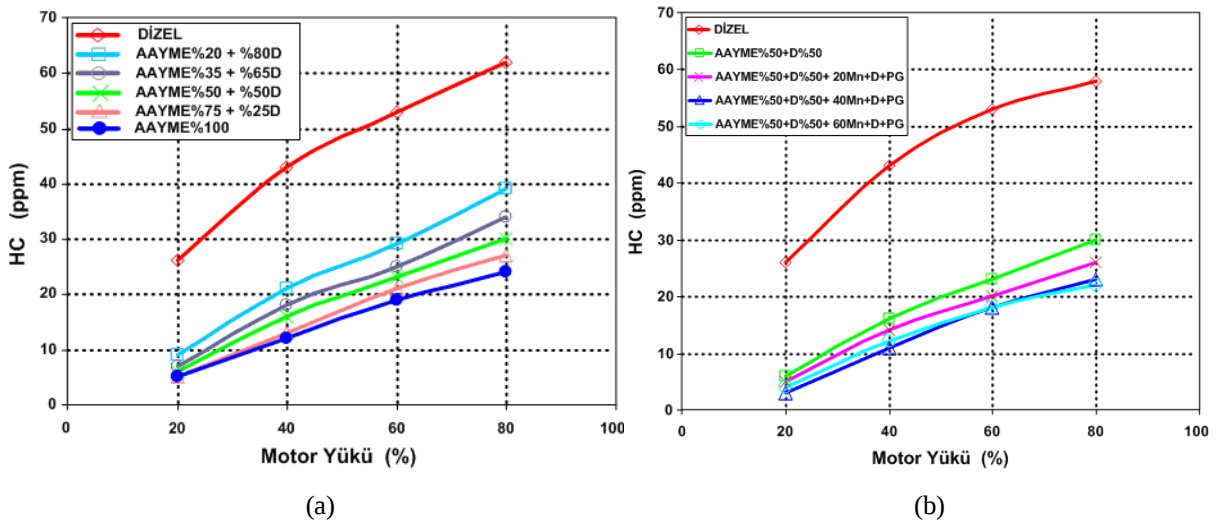
#### **5.5.4. AAYME İçerikli Yakıt Numunelerinin Hidrokarbon (HC) Emisyonları**

##### **Analizi**

HC emisyonlarının oluşmasında iki önemli unsur ön plana çıkmaktadır. Birincisi, önceki çevrimden kalan yanmış gazlardır[77]. Motordaki iş sonunda, enjektör ucuna yakın kör noktalarda ve enjektör deliğinde bir miktar da olsa, bir sonraki çevrime yanmış gazlar kalır. Yanma odasında kalan bu gazlar bir sonraki çevrimde sıkıştırılan hava ile karışır. Bu durum yeni hava-yakıt karışımının oksijen oranını düşürerek HC emisyonlarının oluşmasına sebebiyet vermektedir [78].

**Tablo 5.36.** AAYME için hazırlanan yakıt türlerinin değişken yükteki HC değerleri

| Yakıt türü    | HC emisyonu (ppm) |      |      |      |
|---------------|-------------------|------|------|------|
|               | % 20              | % 40 | % 60 | % 80 |
| DY            | 26                | 43   | 53   | 62   |
| B20           | 9                 | 21   | 29   | 39   |
| B35           | 7                 | 18   | 25   | 34   |
| B50           | 6                 | 16   | 23   | 30   |
| B75           | 5                 | 13   | 21   | 27   |
| B100          | 5                 | 12   | 19   | 24   |
| B50+20Mn+D+PG | 5                 | 14   | 20   | 26   |
| B50+40Mn+D+PG | 3                 | 11   | 18   | 23   |
| B50+60Mn+D+PG | 4                 | 12   | 18   | 22   |



**Şekil 5.36.** AAYME için hazırlanan yakıt türlerinin HC emisyonlarının değişimi;

(a) Biyodizel içerikli numuneler, (b) Katkı maddeli numuneler

AAYME'den hazırlanan B20, B35, B50, B75 ve B100 yakıtlarının ölçülen HC emisyonu değerleri, dizel yakıtın değerleriyle karşılaştırılmıştır. Ölçülen HC emisyonu değerleri Tablo 5.36'de sunulmuştur. Biyodizel yakıtları, dizel yakıtının HC emisyonu değerleriyle kıyaslandığında; B20 yakıtında % 46.6, B35 yakıtında % 53.5, B50 yakıtında % 59, B75 yakıtında % 64 ve B100 yakıtında % 67 oranında bir azalma tespit edilmiştir.

Motorda biyodizel yakıtının kullanılmasıyla HC emisyonlarında azalma olduğu Şekil 5.36(a)'dan görülmektedir. Bu azalmanın, biyodizel yakıtlarının yapısındaki oksijenden kaynaklandığı düşünülmektedir. Biyodizel yakıtının oksijen içeriğinin fazla olması yanma

reaksiyonuna ek katkı sağlayarak, HC emisyonlarının azalmasına neden olduğu düşünülmektedir. Test edilen yakıt numunelerinin HC emisyon değerlerinde belirgin farklılığın olduğu Şekil 5.36(a)'dan görülmektedir. Her yakıt numunesinin kimyasal içeriğinde değişken oranda oksijen bulunması ve dizel yakıt içerisindeki biyodizel oranının artmasıyla setan sayısı değerinin de aynı paralelde artış göstermesi bu belirgin farklılığın sebebi olarak gösterilebilir. Motordaki yükün artmasıyla beraber tüm yakıtların CO emisyon değerlerinde artış gözlenmiştir. Bu artışın nedeni; yükün artmasına paralel olarak kütleli yakıt sarfiyatının artması şeklinde açıklanabilir.

Literatürde yapılan çalışmalarda; dizel yakıtının, yanma odasında hava ile istenen düzeyde bir karışım oluşturmaması neticesinde yüksek CO ve HC emisyonlarının olduğu belirtilmiştir. Biyodizel karışimli yakıtların yapısında oksijen bulunması sebebiyle; CO, HC ve duman emisyonlarında azalma tespit edilmiştir. Çünkü yakıtın oksijen içeriği yanma sırasında ek oksijen sağlayarak tam yanmayı geliştirmekte ve bu durumun HC emisyonlarının azalmasına katkı sağladığı belirtilmiştir. Bununla beraber setan sayısı, kaynama noktası, kükürt ve aromatik bileşen içeriği gibi özelliklerin de CO, HC ve duman emisyonlarındaki değişim üzerinde etkili olduğunu ifade edilmiştir [70,71,77,78].

B50 yakıtının HC emisyonu değerleri de, B50+20Mn+PG, B50+40Mn+PG ve B50+60Mn+PG yakıtlarının HC emisyonu değerleriyle karşılaştırılmıştır. Test yakıtlarının HC emisyonu değerleri Tablo 5.36'de sunulmuştur. Katkı ilaveli yakıtlar, B50 yakıtının HC emisyonu değerleriyle kıyaslandığında; B50+20Mn+PG yakıtında % 13.5, B50+40Mn+PG yakıtında % 26.3, B50+60Mn+PG yakıtında % 25.4 oranında bir azalma tespit edilmiştir.

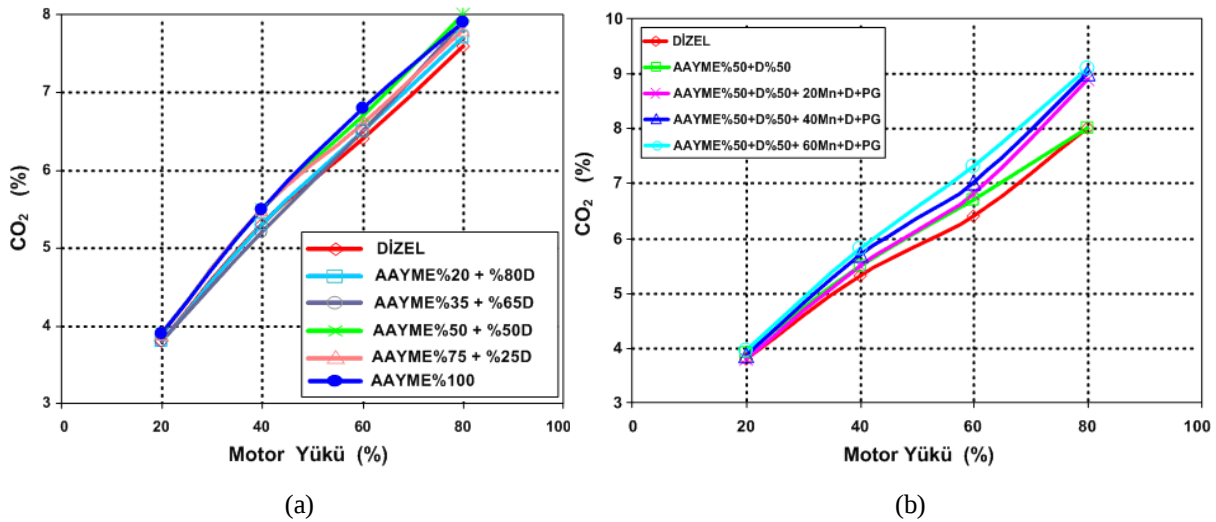
Test yakıtlarına katkı maddelerinin ilave edilmesiyle HC emisyon değerleri B50 yakıtına kıyasla azalma olduğu Şekil 5.36(b)'de görülmüştür. Katkı maddeleri yakıtın setan sayısını ve oksijen içeriğini arttırdığı ve neticesinde de iyi bir yanma karakteristiğinin oluşmasına katkı sağladığı düşünülmektedir. Propilen glikolun ve dodekanolun oksijen bakımından zengin bir yapıya sahip olması, Mn bazlı katkı maddesinin ise setan sayısı üzerinde olumlu bir katkı sağladığı düşünülmektedir.

#### **5.5.5. AAYME İçerikli Yakıt Numunelerinin Karbondioksit (CO<sub>2</sub>) Emisyonları Analizi**

CO<sub>2</sub> emisyonları doğrudan yanma ile ilgilidir. Dizel bir motor düşük devirde çalışıyorsa, yanma performansı da düşüktür. Çünkü düşük devirlerde silindir içi sıcaklık değeri optimum şartlarda olmadığı için kötü bir yanma reaksiyonu gerçekleşmektedir [78].

**Tablo 5.37.** AAYME için hazırlanan yakıt türlerinin değişken yükteki CO<sub>2</sub> değerleri

| Yakıt türü    | CO <sub>2</sub> emisyonu (%) |      |      |      |
|---------------|------------------------------|------|------|------|
|               | % 20                         | % 40 | % 60 | % 80 |
| DY            | 3,8                          | 5,3  | 6,4  | 7,6  |
| B20           | 3,8                          | 5,3  | 6,5  | 7,7  |
| B35           | 3,8                          | 5,2  | 6,5  | 7,9  |
| B50           | 3,9                          | 5,5  | 6,7  | 8    |
| B75           | 3,9                          | 5,5  | 6,6  | 7,8  |
| B100          | 3,9                          | 5,5  | 6,8  | 7,9  |
| B50+20Mn+D+PG | 3,8                          | 5,5  | 6,8  | 8,9  |
| B50+40Mn+D+PG | 3,85                         | 5,7  | 7    | 9    |
| B50+60Mn+D+PG | 3,95                         | 5,8  | 7,3  | 9,1  |



**Şekil 5.37.** AAYME için hazırlanan yakıt türlerinin CO<sub>2</sub> emisyonlarının değişimi;

(a) Biyodizel içerikli numuneler, (b) Katkı maddeli numuneler

AAYME'den hazırlanan B20, B35, B50, B75 ve B100 yakıtlarının ölçülen CO<sub>2</sub> emisyonu değerleri, dizel yakıtının değerleriyle karşılaştırılmıştır. Ölçülen CO<sub>2</sub> emisyonu değerleri Tablo 5.37'de sunulmuştur. Biyodizel yakıtları, dizel yakıtının CO<sub>2</sub> emisyonu değerleri ortalamasıyla kıyaslandığında; B20 yakıtında % 0,8, B35 yakıtında % 1,15, B50 yakıtında % 4, B75 yakıtında % 3 ve B100 yakıtında % 4,3 oranında bir artış tespit edilmiştir.

Şekil 5.37(a)'dan, test yakıtlarının hepsinde motordaki yükün artmasıyla beraber CO<sub>2</sub> emisyon değerlerinde artış olduğu görülmektedir. Motordaki yükün artmasına paralel bir artış

gösteren ÖYT ve egzoz çıkış sıcaklığı değerlerinin, CO<sub>2</sub> emisyonlarındaki artışa sebebiyet verdiği düşünülmektedir. Tablo 5.37'deki veriler incelendiğinde, dizel yakıtının içerisindeki biyodizel oranının artmasıyla CO<sub>2</sub> emisyon değerleri artmıştır. Dizel yakıtına kıyasla biyodizelin yapısında daha fazla bulunan oksijenin, silindir içindeki yanma esnasında karbon atomu ile reaksiyona girerek CO<sub>2</sub> emisyonlarını oluşturduğu düşünülmektedir. Ayrıca Şekil 5.38(a)'da görüldüğü gibi yükün artmasıyla O<sub>2</sub> emisyonu değerlerinin düşmesi de bu durumu desteklemektedir.

B50 yakıtının CO<sub>2</sub> emisyonu değerleri de, B50+20Mn+PG, B50+40Mn+PG ve B50+60Mn+PG yakıtlarının CO<sub>2</sub> emisyonu değerleriyle karşılaştırılmıştır. Test yakıtlarının CO<sub>2</sub> emisyonu değerleri Tablo 5.37'de sunulmuştur. Katkı ilaveli yakıtlar, B50 yakıtının CO<sub>2</sub> emisyonu değerleriyle kıyaslandığında; B50+20Mn+PG yakıtında % 4.1, B50+40Mn+PG yakıtında % 6.3, B50+60Mn+PG yakıtında % 8.55 oranında bir artış tespit edilmiştir.

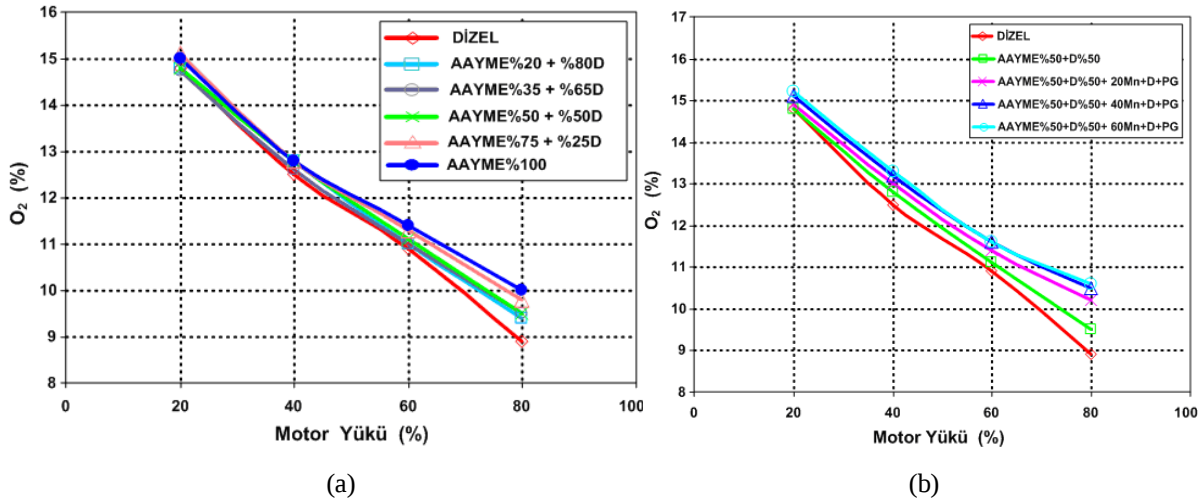
Şekil 5.37(b)'den görüldüğü gibi, katkı maddeleri, ilave edildikleri yakıtlarında CO<sub>2</sub> emisyon değerlerinin artışına sebep olmuştur. Katkı maddeleri, ilave edildikleri yakıtların oksijen içeriğini arttırmaktadır. Yanma reaksiyonu esnasında ortamda oksijen miktarının fazla olması, daha fazla karbon atomu oksitlenmesine ve bunun neticesinde de CO<sub>2</sub> emisyonlarının artmasına neden olduğu düşünülmektedir. Ayrıca katkı maddeleri, numunelerin setan sayısı, viskozite, yoğunluk ve parlama noktası gibi özellikleri iyileştirerek yanma verimine katkı sağlamaktadır [45,70-76]. İyi bir yanma reaksiyonunun oluşması, silindir içi sıcaklığı arttırırken beraberinde de CO<sub>2</sub> emisyon değerlerinin yükselmesine sebep olduğu düşünülmektedir.

#### **5.5.6. AAYME Yakıt Numunelerinin Oksijen (O<sub>2</sub>) Emisyonları Analizi**

İçten yanmalı motorlarda enerji, hava-yakıt karışımının yanması sonucu elde edilmektedir. Hava ve yakıtın içerisinde bulunan oksijen motorda yanma reaksiyonu sonucunda oluşan bir emisyon ürünüdür.

**Tablo 5.38.** AAYME yakıt türlerinin değişken yükteki O<sub>2</sub> değerleri

| Yakıt türü    | O <sub>2</sub> emisyonu (ppm) |      |      |      |
|---------------|-------------------------------|------|------|------|
|               | % 20                          | % 40 | % 60 | % 80 |
| DY            | 14,8                          | 12,5 | 10,9 | 8,9  |
| B20           | 14,8                          | 12,8 | 11   | 9,4  |
| B35           | 14,75                         | 12,6 | 11   | 9,5  |
| B50           | 14,8                          | 12,8 | 11,1 | 9,5  |
| B75           | 15,1                          | 12,8 | 11,3 | 9,8  |
| B100          | 15                            | 12,8 | 11,4 | 10   |
| B50+20Mn+D+PG | 14,9                          | 13   | 11,4 | 10,2 |
| B50+40Mn+D+PG | 15,1                          | 13,2 | 11,6 | 10,5 |
| B50+60Mn+D+PG | 15,2                          | 13,3 | 11,6 | 10,6 |



**Şekil 5.38.** AAYME için hazırlanan yakıt türlerinin O<sub>2</sub> emisyonlarının değişimi;

(a) Biyodizel içerikli numuneler, (b) Katkı maddeli numuneler

AAYME'den hazırlanan B20, B35, B50, B75 ve B100 yakıtlarının ölçülen O<sub>2</sub> emisyonu değerleri, dizel yakıtın değerleriyle karşılaştırılmıştır. Ölçülen O<sub>2</sub> emisyonu değerleri Tablo 5.38'de sunulmuştur. Biyodizel yakıtları, dizel yakıtının O<sub>2</sub> değerleri ortalamasıyla kıyaslandığında; B20 yakıtında % 2, B35 yakıtında % 1.65, B50 yakıtında % 2.4, B75 yakıtında % 4.1 ve B100 yakıtında % 4.5 oranında bir artış tespit edilmiştir.

Tüm test yakıtları için motordaki yük arttıkça O<sub>2</sub> emisyonlarında azalma olduğu Şekil 5.38(a)'dan görülmektedir. Test yakıtlarının %20 yükte yüksek olan O<sub>2</sub> emisyonu değerleri yüklemenin artmasıyla ters orantılı olarak azalmıştır. %20 yükte silindir içi sıcaklığın düşük olması nedeniyle, oksijenin karbon atomu ile reaksiyon oluşturamadığı düşünülmektedir. %20 yükte karbon oksijen oksitlenmesi gerçekleşmemesi neticesinde, egzoz gazlarındaki O<sub>2</sub>

miktarının arttığı, CO<sub>2</sub> miktarının da azaldığı Şekil 5.37(a) ve Şekil 5.38(a)'dan görülmektedir. Dizel yakıt içerisindeki biyodizel oranının artmasıyla, O<sub>2</sub> emisyonları da aynı paralelde arttığı Şekil 5.38(a)'dan görülmektedir. Biyodizelin dizel yakıtına göre daha fazla oksijen içermesi, biyodizel yakıtlarında O<sub>2</sub> emisyonlarının yüksek çıkmasına sebep olduğu düşünülmektedir. Biyodizel kullanıldığında elde edilen CO emisyonlarının daha düşük olması bu düşüncüyü ayrıca desteklemektedir.

B50 yakıtının O<sub>2</sub> emisyonu değerleri de, B50+20+PG, B50+40Mn+PG ve B50+60Mn+PG yakıtlarının O<sub>2</sub> emisyonu değerleriyle karşılaştırılmıştır. Test yakıtlarının O<sub>2</sub> emisyonu değerleri Tablo 5.38'de sunulmuştur. Katkı ilaveli yakıtlar, B50 yakıtının O<sub>2</sub> emisyonu değerleriyle kıyaslandığında; B50+20Mn+PG yakıtında % 2.7, B50+40Mn+PG yakıtında % 4.6, B50+60Mn+PG yakıtında % 5.2 oranında bir artış tespit edilmiştir.

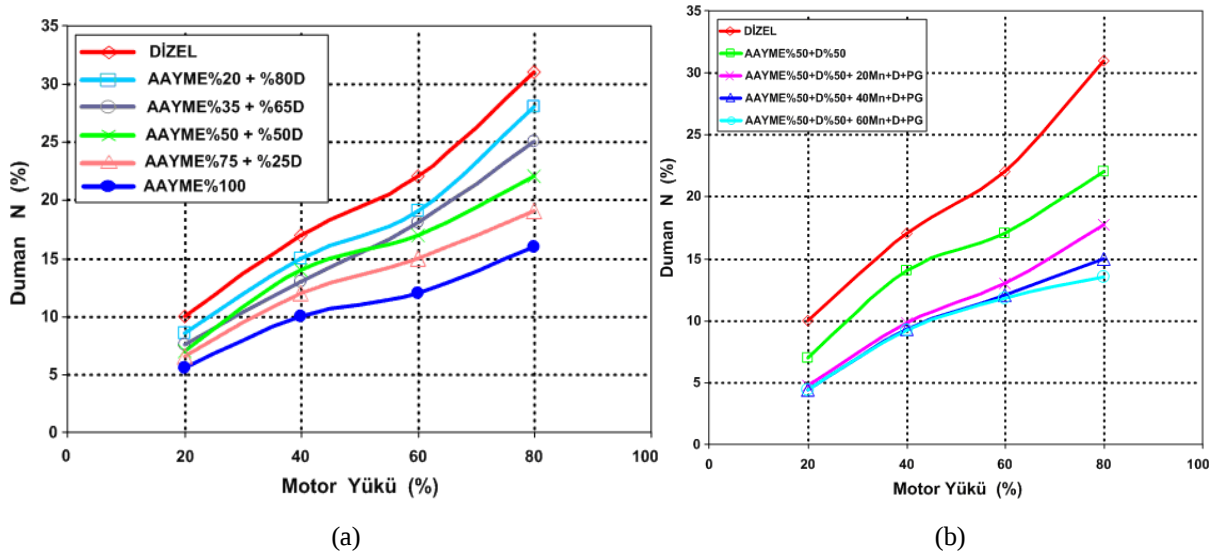
Şekil 5.38(b)'de görüldüğü gibi katkılı yakıt numunelerinde düşük yük şartlarında yüksek olan oksijen miktarı, yüklemenin artmasıyla orantılı olarak düşmüştür. Yükün artmasıyla beraber O<sub>2</sub> emisyon değerlerinin tüm test yakıtları için düşmesinin nedenini, %20 ile %80 yük değerleri arasında O<sub>2</sub> ile CO<sub>2</sub> emisyon değerlerinin ters orantılı olması şeklinde açıklanabilir. Şekil 5.37(b)'de ve Şekil 5.38(b)'de görüldüğü gibi, O<sub>2</sub> değerlerinin yüksek olduğu durumda CO<sub>2</sub> değerleri düşük, O<sub>2</sub> değerlerinin düşük olduğu durumda CO<sub>2</sub> değerleri yüksek olduğu görülmektedir. Şekil 5.38(b)'den görüldüğü gibi, katkı maddelerinin ilavesi ile O<sub>2</sub> emisyonu değerlerinde artış olmuştur. Bu artışın, gerek biyodizel yakıtındaki gerekse katkı maddelerindeki oksijen içeriğinin fazla olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Katkı maddelerinin %20 yük durumundan itibaren, O<sub>2</sub> emisyon değerlerinde farklılığa sebebiyet verdiği Şekil 5.38(b)'den görülmektedir. Her ne kadar karbon atomu oksitlemesi sonucu CO<sub>2</sub>'ye dönüşüm olsa da katkı ilaveli yakıtlardaki oksijen miktarının fazla olması bazı oksijen gazlarının karbon atomu ile bağ kuramamasına sebep olduğu düşünülmektedir. Katkılı numunelerin içeriğindeki oksijen miktarının, B50 yakıtı ile katkı ilaveli yakıtların O<sub>2</sub> emisyon değerleri arasındaki farklılığı oluşturduğu düşünülmektedir.

#### **5.5.7. AAYME İçerikli Yakıt Numunelerinin Duman (İs) Emisyonları Analizi**

Alev içerisindeki türbülanslı karışım alanları ve Sıcaklık is oluşumunu etkileyen önemli parametrelerdir. Bölgesel sıcaklık değişimi ve oksijen konsantrasyonu dağılımı is oluşum mekanizmasının temel fiziksel büyüklükleridir. Bununla beraber yakıtın yüksek oksijen içeriği, düşük C/H oranı ve aromatik bileşenlerin olmaması duman oluşumunda önemli bir etkiye sahiptir [76].

**Tablo 5.39.** AAYME için hazırlanan yakıt türlerinin değişken yükteki duman emisyon değerleri

| Yakıt türü    | Duman emisyonu (%) |      |      |      |
|---------------|--------------------|------|------|------|
|               | % 20               | % 40 | % 60 | % 80 |
| DY            | 10                 | 17   | 22   | 31   |
| B20           | 8,5                | 15   | 19   | 28   |
| B35           | 7,5                | 13   | 18   | 25   |
| B50           | 7                  | 14   | 17   | 22   |
| B75           | 6,5                | 12   | 15   | 19   |
| B100          | 5,5                | 10   | 12   | 16   |
| B50+20Mn+D+PG | 4,7                | 9,8  | 13   | 17,7 |
| B50+40Mn+D+PG | 4,4                | 9,3  | 12   | 15   |
| B50+60Mn+D+PG | 4,4                | 9,2  | 11,8 | 13,5 |



**Şekil 5.39.** AAYME için hazırlanan yakıt türlerinin duman emisyonlarının değişimi;

(a) Biyodizel içerikli numuneler, (b) Katkı maddeli numuneler

AAYME'den hazırlanan B20, B35, B50, B75 ve B100 yakıtlarının ölçülen duman emisyon değerleri, dizel yakıtının değerleriyle karşılaştırılmıştır. Ölçülen duman emisyonu değerleri Tablo 5.39'da sunulmuştur. Biyodizel yakıtları, dizel yakıtının duman emisyon değerleriyle kıyaslandığında; B20 yakıtında % 12, B35 yakıtında % 20.8, B50 yakıtında % 25, B75 yakıtında % 34.5 ve B100 yakıtında % 46 oranında bir azalma tespit edilmiştir.

Biyodizel kullanıldığında duman emisyonu değerlerinin dizel yakıtına göre düşük çıkmasının temel nedeni, biyodizelin oksijen bakımından zengin bir yapıya sahip olması olarak açıklanabilir. Ayrıca dizel yakıtına kıyasla daha düşük karbon atomu içeren biyodizel,

yapısındaki oksijenden dolayı yanma sırasında oksitlenme miktarını arttırarak, duman emisyonlarının oluşumunu azalttığı düşünülmektedir. Nitekim; dizel yakıt içerisindeki biyodizel oranının artmasıyla duman emisyonlarının azaldığı Şekil 5.39(a)'da görülmektedir.

Biyodizelin oksijen içeriğinden dolayı, duman emisyonlarında önemli bir düşüş sağlandığı belirtilmiştir [77]. Ayrıca karbon içeriğinin düşük olmasından dolayı duman emisyonlarının azaldığı da belirtilmiştir. Oksijen içerikli yakıtlar silindir içi sıcaklığı arttırmaktadır. Bu artışın yanma verimini olumlu etkileyerek bölgesel sıcaklık değişimini önlediği düşünülmektedir. Bölgesel sıcaklık değişimi ve oksijen konsantrasyonu dağılımı is oluşumunu tetikleyen temel mekanizmalardır. [76].

B50 yakıtının duman emisyon değerleri de, B50+20Mn+PG, B50+40Mn+PG ve B50+60Mn+PG yakıtlarının duman emisyon değerleriyle karşılaştırılmıştır. Test yakıtlarının duman emisyonu değerleri Tablo 5.39'da sunulmuştur. Katkı ilaveli yakıtlar, B50 yakıtının duman emisyon değerleriyle kıyaslandığında; B50+20Mn+PG yakıtında % 24.5, B50+40Mn+PG yakıtında % 32.1, B50+60Mn+PG yakıtında % 35.25 oranında bir azalma tespit edilmiştir.

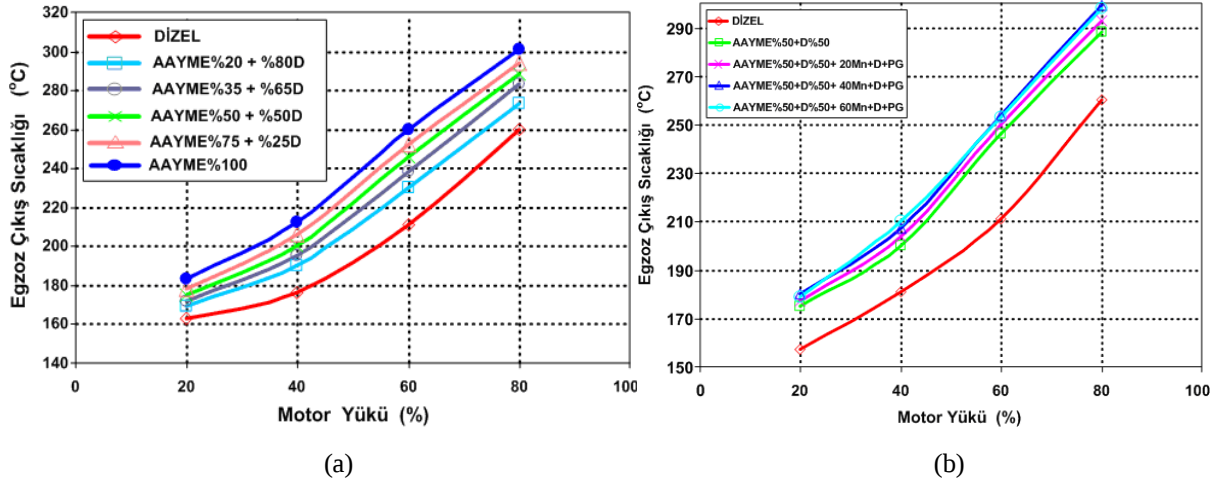
Şekil 5.39(b)'den görüldüğü gibi, katkı maddelerinin ilavesi ile duman emisyonu değerlerinde azalma olmuştur. Kullanılan katkı maddelerinin oksijen oranı biyodizel yakıtlarına kıyasla daha fazladır. B50 yakıtının Mn, propilen glikol ve dodekanol gibi katkı maddeleriyle desteklenmesi karbon oranını düşürüp oksijen oranı arttırmaktadır. Oksijen miktarının artması, yanma sırasında oksitlenme reaksiyonu hızlandırarak duman oluşumu azalttığı düşünülmektedir. Ayrıca yakıta ilave edilen katkı maddeleri yanma reaksiyonuna istikrarlı bir yapı kazandırıp, alev içerisinde türbülanslı karışım alanları ve duman emisyonları oluşumlarını engellediği düşünülmektedir.

#### **5.5.8. AAYME İçerikli Yakıt Numunelerinin Egzoz Gazları Sıcaklık Analizi**

İçten yanmalı motorlarda silindir içerisinde yakıtın yanması sonucu elde edilen ısı enerjisinin bir kısmı soğutma, egzoz ve sürtünme yolu ile kaybedilmektedir. Kaybedilen bu enerji kayıplar neticesinde geriye kalan ısı enerjisi mekanik enerjiye dönüştürülerek motordaki güç elde edilmektedir.

**Tablo 5.40.** AAYME için hazırlanan yakıt türlerinin değişken yükteki egzoz çıkış sıcaklığı değerleri

| Yakıt türü    | Egzoz çıkış sıcaklığı (°C) |      |      |      |
|---------------|----------------------------|------|------|------|
|               | % 20                       | % 40 | % 60 | % 80 |
| DY            | 163                        | 176  | 211  | 260  |
| B20           | 169                        | 190  | 230  | 273  |
| B35           | 172                        | 195  | 238  | 283  |
| B50           | 175                        | 200  | 246  | 288  |
| B75           | 178                        | 206  | 252  | 294  |
| B100          | 183                        | 212  | 260  | 301  |
| B50+20Mn+D+PG | 177                        | 204  | 250  | 293  |
| B50+40Mn+D+PG | 180                        | 207  | 254  | 299  |
| B50+60Mn+D+PG | 179                        | 210  | 253  | 298  |



**Şekil 5.40.** AAYME için hazırlanan yakıt türlerinin egzoz çıkış sıcaklığı değişimi;

(a) Biyodizel içerikli numuneler, (b) Katkı maddeli numuneler

AAYME'den hazırlanan B20, B35, B50, B75 ve B100 yakıtlarının ölçülen egzoz çıkış sıcaklığı değerleri, dizel yakıtın değerleriyle karşılaştırılmıştır. Ölçülen egzoz çıkış sıcaklığı değerleri Tablo 5.40'da sunulmuştur. Biyodizel yakıtları, dizel yakıtının egzoz çıkış sıcaklığı değerleriyle kıyaslandığında; B20 yakıtında %6.75, B35 yakıtında % 9.9, B50 yakıtında % 12.7, B75 yakıtında %15.1 ve B100 yakıtında % 18.5 oranında bir artış tespit edilmiştir.

Şekil 5.40(a)'dan görüldüğü gibi, motordaki yükün artmasıyla beraber test yakıtlarının egzoz çıkış sıcaklıkları artmıştır. Motorda üretilmesi gereken gücü arttırabilmek için daha fazla ısı enerjisine ihtiyaç duyulmaktadır. Yanma odasındaki ısı enerjisinin yüksek olması, egzoz çıkış sıcaklığının yüksek olmasına sebep olduğu düşünülmektedir. Motorda biyodizel yakıtının kullanılmasıyla egzoz çıkış sıcaklığının arttığı Şekil 5.40(a)'dan görülmektedir.

Dizel yakıtı ile biyodizel yakıtının egzoz çıkış sıcaklığı değerlerindeki farklılığa, biyodizel yakıtının oksijen içeriği ve setan sayısının yüksek olması gibi özelliklerden kaynaklandığı düşünülmektedir. Test yakıtlarının, içeriğindeki oksijen nispetinde iyi bir yanma performansı sergileyerek, farklı değerlerde egzoz çıkış sıcaklığı oluşturduğu düşünülmektedir. Ayrıca biyodizelin sahip olduğu yüksek viskozite ve setan sayısından dolayı daha yavaş ve uzun bir yanmanın gerçekleşiyor olması biyodizel kullanımında daha yüksek egzoz sıcaklığın oluşmasına sebep olarak gösterilebilir. Dizel motorlarda yakıt olarak biyodizel kullanıldığında yanmanın daha uzun devam etmesinden dolayı egzoz sıcaklığının daha yüksek çıktığını belirtmiştir [78]. Egzoz gazı sıcaklığının tutuşma gecikmesinden etkilendiğini ve biyodizelin setan sayısının yüksek olmasından dolayı daha düşük tutuşma gecikmesi periyodu sergilediğini ve bunun da biyodizel kullanıldığında egzoz gazı sıcaklığını artırdığını belirtmiştir [13].

B50 yakıtının egzoz çıkış sıcaklığı değerleri de, B50+20Mn+PG, B50+40Mn+PG ve B50+60Mn+PG yakıtlarının egzoz çıkış sıcaklığı değerleriyle karşılaştırılmıştır. Test yakıtlarının egzoz çıkış sıcaklığı değerleri Tablo 5.40'da sunulmuştur. Katkı ilaveli yakıtlar, B50 yakıtının egzoz çıkış sıcaklığı değerleriyle kıyaslandığında; B50+20Mn+PG yakıtında %2, B50+40Mn+PG yakıtında % 3.6, B50+60Mn+PG yakıtında % 3.6 oranında bir artış tespit edilmiştir.

Şekil 5.40(b)'den görüldüğü gibi, B50 yakıtına ilave edilen Mn, dodekanol ve propilen glikol gibi katkı maddeleri egzoz çıkış sıcaklık değerlerini arttırmıştır. Katkı maddeleri yakıtın setan sayısını ve oksijen içeriğini arttırdığı ve neticesinde de iyi bir yanma karakteristiğinin oluşmasına katkı sağladığı düşünülmektedir. Yüksek setan sayısı daha düşük tutuşma gecikmesi periyodu oluşturduğundan egzoz gazı sıcaklığı artmaktadır. Yakıtın kimyasal bağ yapısındaki oksijen miktarının artması, yakıtlara olumlu bir yanma performansı kazandırarak, egzoz çıkış sıcaklığını arttırmaktadır[13,78].

## 5.6. 100 Saatlik Motor Testlerinin Değerlendirilmesi

Biyodizel yakıtının dört zamanlı ve direk enjeksiyonlu bir dizel motorda alternatif yakıt olarak kullanılması halinde, motor elemanları üzerindeki etkileri ve uzun süreli çalışmalarda kullanılabilirliği incelenmiştir. Biyodizel yakıtının dizel motorlarda uzun süreli olarak çalıştırılabilmesi için, silindir gömleğinin, pistonun, segmanların, supapların, enjektörün ve yağlama yağının özelliklerinin değişmemesi gerekmektedir. Motor elemanlarının belirtilen bu durumlarını incelemek amacıyla, Lombardini marka 6 LD 400 model tek silindirli dört zamanlı, direkt püskürtmeli ve hava soğutmalı bir dizel motor, %50 atık ayçiçeği yağı metil esteri ve %50 dizel yakıtı karışımı (B50) ile, %80 yük altında 100 saatlik bir test çalışması gerçekleştirilmiştir. Ayrıca aynı motor, aynı şartlarda dizel yakıtı ile de 100 saat çalıştırılarak, sonuçlar karşılaştırılmıştır. Deneylerde kullanılan dizel motorun görüntüsü Şekil 5.41'de, teknik özellikleri de Tablo 5.41 'de verilmiştir.

**Tablo 5.41.** Deneylerde kullanılan dizel motorun teknik özellikleri

|                                   |                        |
|-----------------------------------|------------------------|
| <b>Motorun Modeli</b>             | Lombardini 6 LD 400    |
| <b>Silindir Çapı</b>              | 86 mm                  |
| <b>Silindir Sayısı</b>            | 1                      |
| <b>Silindir Hacmi</b>             | 395 cm <sup>3</sup>    |
| <b>Strok</b>                      | 68 mm                  |
| <b>Sıkıştırma Oranı</b>           | 18:1                   |
| <b>Maksimum Tork</b>              | 2200 dev/dak 'da 20 Nm |
| <b>Enjektör Püskürtme Basıncı</b> | 200 bar                |



**Şekil 5.41.** Deneylerde kullanılan 6 LD 400 Lombardini marka motorun genel görüntüsü

Biyodizel ve dizel yakıtlarının kullanıldığı 100 saatlik çalışma üç ana başlık halinde incelenmiştir.

- Motor parçaları üzerinde meydana gelen birikintinin incelenmesi
- Yağlama yağının özelliklerinin incelenmesi
- Motor parçalarının SEM ve EDS analizi ile mikro yapısının incelenmesi

#### **5.6.1. Biyodizel ve dizel Yakıtı Kullanılan Motorların, Parçaları Üzerindeki birikintilerin incelenmesi**

Deneylere başlamadan önce motor sökülüş ve motor elemanları incelenmiştir. Yanma odası, enjektör ucu, piston üst kısmı, silindir cidarları, üst kapak, supaplar ve yuvaları benzin ile temizlenerek yerine takılmıştır. Biyodizel yakıtı ile 100 saat test çalışması gerçekleştirildikten sonra motor sökülüş ve motor elemanları incelenmiştir. Enjektör ucu, piston üst kısmı, üst kapak, supaplar ve yuvaları ayrı ayrı incelenerek fotoğrafları çekilmiştir. Aynı işlemler, dizel yakıtının kullanıldığı çalışmada da gerçekleştirilmiştir.

#### **5.6.1.1. Dizel Yakıtı ile 100 saat Çalışma Sonunda Motor Parçaları üzerindeki birikintinin incelenmesi**

Dizel yakıtı ile 100 saat çalışma sonunda motor sökülüş ve motor elemanları incelenmiştir. Enjektör ucu, piston üst kısmı, silindir cidarları, üst kapak, supaplar ve yuvaları ayrı ayrı incelenerek fotoğraflanmıştır. Bu görüntüler Şekil 5.42-47’de verilmiştir.



**Şekil 5.42.** Dizel yakıtı ile çalışma sonrası yakıt enjektör ucunun görünümü



**Şekil 5.43** Dizel yakıtı ile çalışma sonrası silindir üst yüzeyinin görünümü



**Şekil 5.44.** Dizel yakıtı ile çalışma sonrası piston-segman takımının görünümü



**Şekil 5.45.** Dizel yakıtı ile çalışma sonrası yakıt silindir gömleğinin görünümü



**Şekil 5.46.** Dizel yakıtı ile çalışma sonrası üst kapağın görünümü



**Şekil 5.47.** Dizel yakıtı ile çalışma sonrası supapların görünümü

Şekil 5.42-47’de dizel yakıtı ile 100 saat çalışma sonundaki motor parçalarının görünümü verilmiştir. Motor söküldüğünde, supapların tabla ile sap kısmının birleştiği yerde, özellikle de egzoz supapında is ve kurum olduğu görülmüştür. Ayrıca pistonun üst yüzeyinde ve enjektörün memesi civarında birikinti olduğu görülmüştür. Oluşan tüm birikintiler parlak ve siyah renktedir. Motorda oluşan bu islenmenin, motorun düzenli çalışmasına engel bir durum teşkil etmediği görülmüştür.

#### **5.6.1.2. Biyodizel Yakıtı ile 100 saat Çalışma Sonunda Motor Parçaları üzerindeki birikintinin incelenmesi**

B50 ile 100 saat çalışma sonunda motor sökülmüş ve motor elemanları incelenmiştir. Enjektör ucu, piston üst kısmı, silindir cidarları, üst kapak, supaplar ve yuvaları incelenerek fotoğraflanmıştır. Bu görüntüler Şekil 5.48-53’de verilmiştir.



**Şekil 5.48.** B50 yakıtı ile çalışma sonrası yakıt enjektör ucunun görünümü



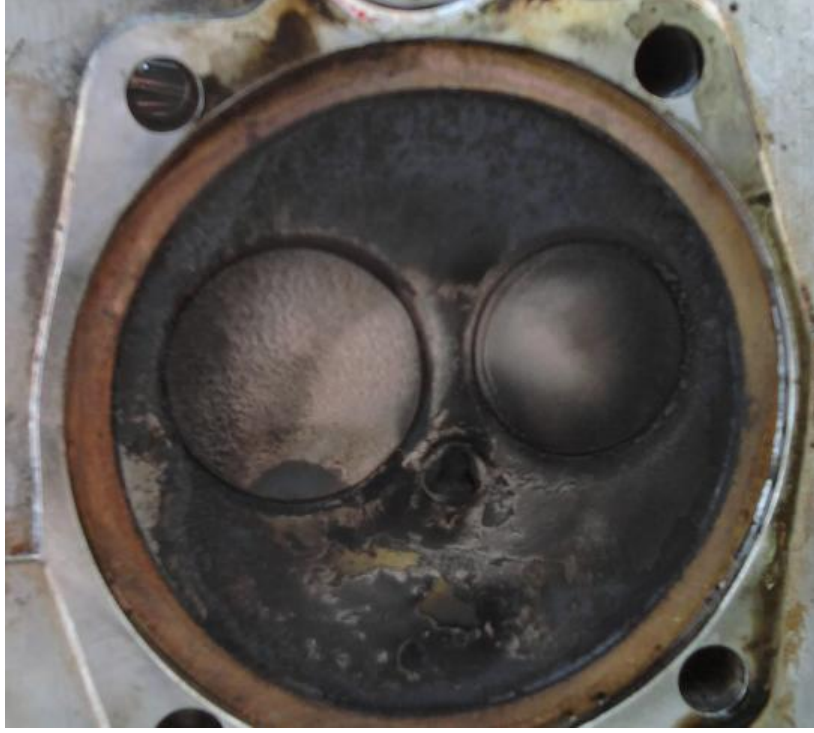
**Şekil 5.49.** B50 yakıtı ile çalışma sonrası silindir üst yüzeyinin görünümü



**Şekil 5.50.** B50 yakıtı ile çalışma sonrası piston-segman takımının görünümü



**Şekil 5.51.** B50 yakıtı ile çalışma sonrası silindir gömleğinin görünümü



**Şekil 5.52.** B50 ile çalışma sonrası üst kapağın görünümü



**Şekil 5.53.** B50 yakıtı ile çalışma sonrası supapların görünümü

B50 yakıtı ile yapılan 100 saatlik çalışma boyunca, motorun çalışmasını etkileyecek herhangi bir olumsuzluğa rastlanmamıştır. 100 saatlik çalışma süresince ilk hareket problemi yaşanmamıştır. B50 ve dizel yakıtının kullanılmasında benzer miktarda motor birikintisi oluşmuştur. Dizel yakıtında birikinti siyah ve parlak bir renkte iken, B50 yakıtında gri ve mat bir renkte oluşmuştur. Dizel ve B50 yakıtı ile çalışmada segman yapışmasına ve kırılmasına rastlanılmamıştır. Hem dizel yakıtı hem de B50 yakıtı ile çalışmada egzoz supapında ve yanma odasının bazı bölgelerinde daha fazla birikinti görülmüştür. Bununla beraber supaplarda herhangi bir hasara rastlanılmamıştır. Çalışma süresince enjektör ucunda toplanan karbonun, motorun çalışma performansını etkileyecek seviyede olmadığı gözlenmiştir. Emme supabı sapında ve giriş kanallarında karbon kalıntısına rastlanılmamıştır. Ü.Ö.N. ile kompresyon segmanının çıktığı son nokta arasının diğer kısımlara göre daha fazla karardığı görülmüştür.

Bu çalışmadaki, motor parçaları üzerindeki birikinti analizi, literatürde yapılan çalışmalar ile benzerlik göstermektedir [6,79,80].

#### 5.6.2. Biyodizel Yakıtı Kullanılan Motorların, Yağlama Yağının İncelenmesi

Motor yağları, motorun hareketli parçalarındaki yağlama görevini yerine getiren kimyasal sıvılardır. Yağlama yağları, motor parçaları üzerinde sürtünme yoluyla oluşan aşınmaları önleme özelliğinin yanında, motor parçalarının soğutulmasına ve temizlenmesine de yardımcı olmaktadır.

B50 ve dizel yakıtlarının kullanıldığı 100 saatlik çalışmada yağlama yağı olarak Petrol Ofisine ait 20/50 dizel motor yağı kullanılmıştır. Test motoru, B50 ve dizel yakıtı kullanılarak; oda sıcaklığında, %80 yük altında 100'er saat çalıştırıldıktan sonra, yağ üzerindeki değişimleri incelemek amacıyla, yağlama yağından 250 ml'lik numuneler alınmıştır. Alınan bu numuneler İnönü Üniversitesi Petrol Analiz Laboratuvarında (PAL) incelenmiştir. Her analiz üç kez tekrarlanmış olup, farklılığın  $\pm$  %3 civarında olduğu görülmüştür. Aşağıdaki tablolarda sunulmuş olan değerler üç değerlerin ortalaması hesaplanarak tespit edilmiştir. Yapılan analiz sonuçları Tablo 5.42 ve 5.43'de sunulmuştur.

**Tablo 5.42.** Dizel ve B50 yakıtının 100 saat'lik motor çalışması sonunda motor yağındaki kül oranı

| Özellik              | Dizel Yakıtı İle Çalışan Motor Yağı | B50 Yakıtı İle Çalışan Motor Yağı | Deney Yöntemi  |
|----------------------|-------------------------------------|-----------------------------------|----------------|
| Yağın kül tayini (%) | 1,096                               | 1,170                             | TS EN ISO 8245 |

**Tablo 5.43.** Dizel ve B50 yakıtının 100 saat'lik motor çalışması sonunda motor yağının viskozite değeri

| Özellik                        | Dizel Yakıtı İle Çalışan Motor Yağı | B50 Yakıtı İle Çalışan Motor Yağı | Deney Yöntemi       |
|--------------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------|---------------------|
| Yağın viskozite değeri (40 °C) | 110,055                             | 104,895                           | TS 1451 EN ISO 3104 |

Tablo 5.42'de verildiği gibi, 100 saatlik motor deneyleri sonucunda dizel yakıtıyla çalışan motor yağının kül oranı 1,096, biyodizel yakıt kullanılan motorda yağlama yağının kül yüzdesi 1,170 oranında tespit edilmiştir.

Tablo 5.43'de verildiği gibi, 100 saatlik motor deneyleri sonucunda dizel yakıtıyla çalışan motor yağının viskozitesi 110,055 iken biyodizel yakıt kullanılan motorda yağlama yağının viskozitesi 104,895 olarak tespit edilmiştir.

### **5.6.3. Motor parçalarına ait numunelerin Üzerindeki Mikro Yapının SEM ve EDS analizi**

Motor parçalarına ait numunelerin yüzeylerinin analiz için hazırlanması Fırat Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümünde gerçekleştirilmiştir.

Metalografik deneyler öncesi numunelerdeki mikro yapıların ve meydana gelen fazları tespit etmek amacıyla; SEM (Scanning Elektron Microscopy), EDS (Energy Dispersive Spectrograf) noktasal analiz çalışmaları gerçekleştirilmiştir.

B50 ve dizel yakıtı ile 100 saatlik çalışmaya tabi tutulan motorlar çalışma sonunda sökülüştür. Her iki motora ait parçalar (piston, silindir gömleği), (10×10×10) mm ebatında kesilerek, Şekil 5.54'de fotoğrafları verilen Steruers Dap-7 marka cihazda 60, 120, 300, 600, 800, 1000, 1200'lük zımpara çeşitlerini kullanılmak suretiyle, incelenecek yüzeyler zımparalanmıştır.



**Şekil 5.54** Zımparalanma işleminin yapıldığı Steruers Dap-7 marka cihaza ait görüntü

Her iki motora ait parçaların zımparalama işlemi bittikten sonra  $1\mu\text{m}$ 'lik elmas pasta ile, Şekil 5.55'de fotoğrafları verilen Metkon FORCIPOL-1 marka cihazda çuhalanmak suretiyle parlatma işlemi gerçekleştirilmiştir.



**Şekil 5.55.** Çuhalama işleminin yapıldığı, Metkon FORCIPOL-1 marka cihaza ait görüntü

Çuhalama işleminin sonunda parlatılan yüzeyler etil alkolle temizlenmiştir. Yüzeyleri temizlenen numunelerden; silindir gömleği % 1 nital ile (%99 etil alkol + % 1 nitrik asit),

piston malzemesine ait numuneler ise keller (190 ml saf su, 5 ml nitrik asit( $\text{HNO}_3$ ), 3 ml hidroklorik asit( $\text{HCl}$ ) ve 2 ml hidroflorik asit( $\text{HF}$ )) kullanılarak dağlanmıştır. Sırasıyla bütün numuneler dağlanarak analizlere hazırlanmıştır.

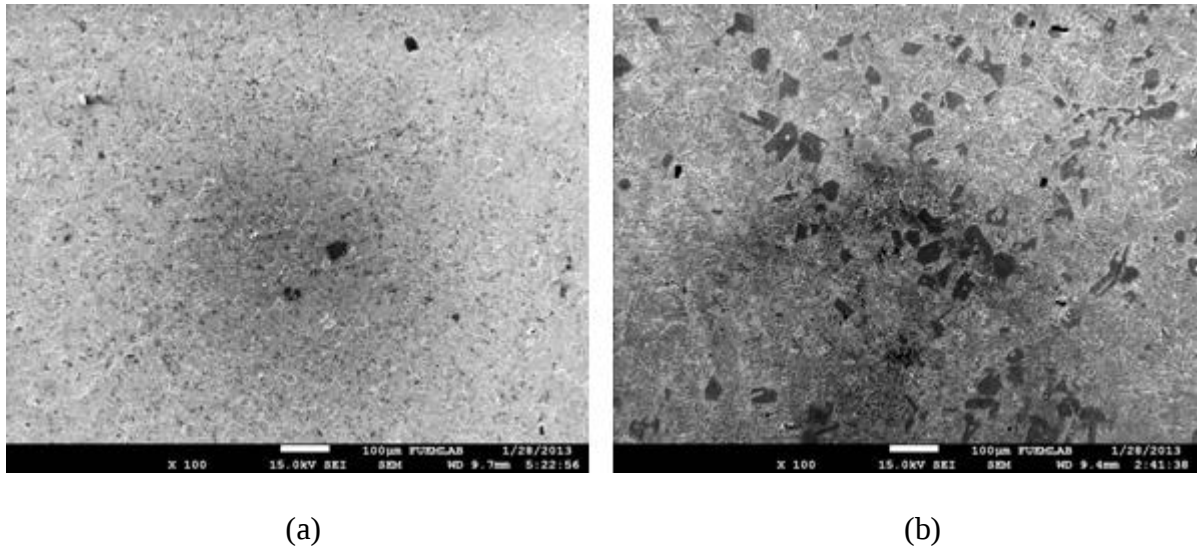
#### 5.6.3.1. SEM (Scanning Elektron Microscopy) analizleri

Taramalı elektron mikroskobunda (SEM) görüntü, yüksek voltaj ile hızlandırılmış elektronların numune üzerine odaklanması, bu elektron demetinin numune yüzeyinde taratılması sırasında elektron ve numune atomları arasında oluşan çeşitli girişimler sonucunda meydana gelen etkilerin uygun algılayıcılarda toplanması ve sinyal güçlendiricilerden geçirildikten sonra, katot ışınları tüpünün ekranına aktarılmasıyla elde edilir [81].

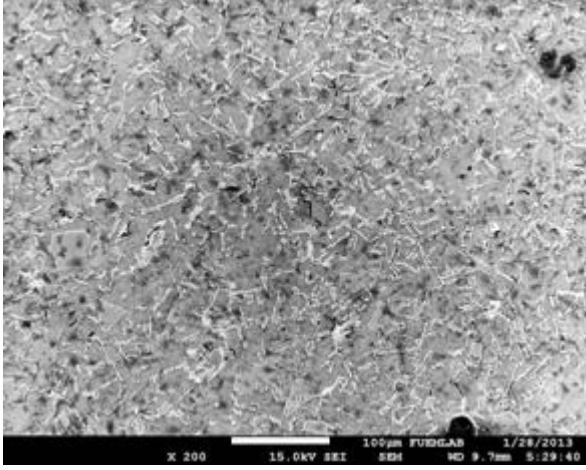
SEM ve EDS analizleri Fırat Üniversitesi, Fen Fakóltesi, Fizik bölümünde gerçekleştirilmiştir.

SEM analizlerinde, motor parçalarından gelen sinyaller dijital sinyallere çevrilmek suretiyle bilgisayar monitörüne yansıtılıp, BMP uzantılı dosya olarak kaydedilmiştir. Kaydedilen bu analiz sonuçları karşılaştırmalı bir şekilde aşağıda sunulmuştur.

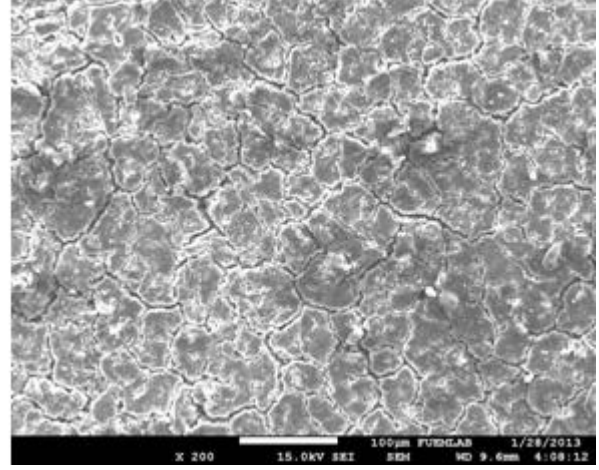
##### 5.6.3.1.1. B50 ve dizel yakıtı ile çalışan motorların pistonları üzerindeki SEM analizleri



şekil 5.56. Dizel ve B50 yakıtı ile çalıştırılmış pistonun X 100 büyültme ile kesiti üzerinden alınan SEM fotoğrafları (a) Dizel yakıtı ile çalışan (b) B50 yakıtı ile çalışan

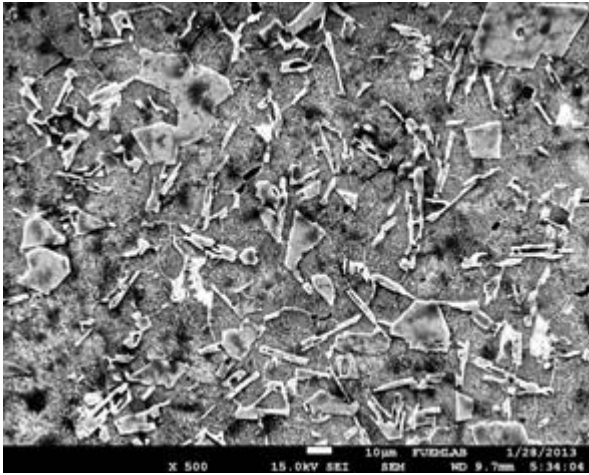


(a)

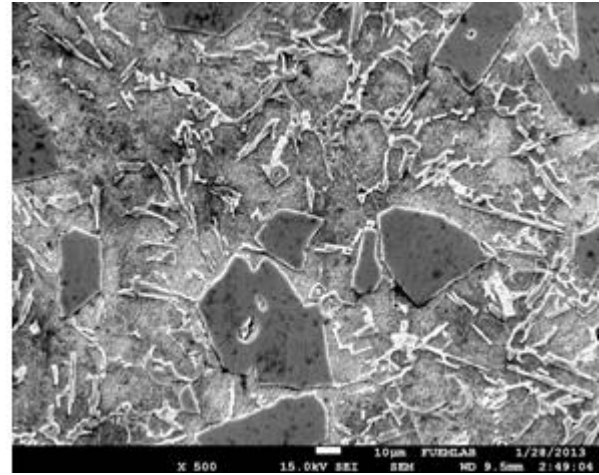


(b)

**Şekil 5.57.** Dizel ve B50 yakıtı ile çalıştırılmış pistonun X 200 büyültme ile kesiti üzerinden alınan SEM fotoğrafları (a) Dizel yakıtı ile çalışan (b) B50 yakıtı ile çalışan



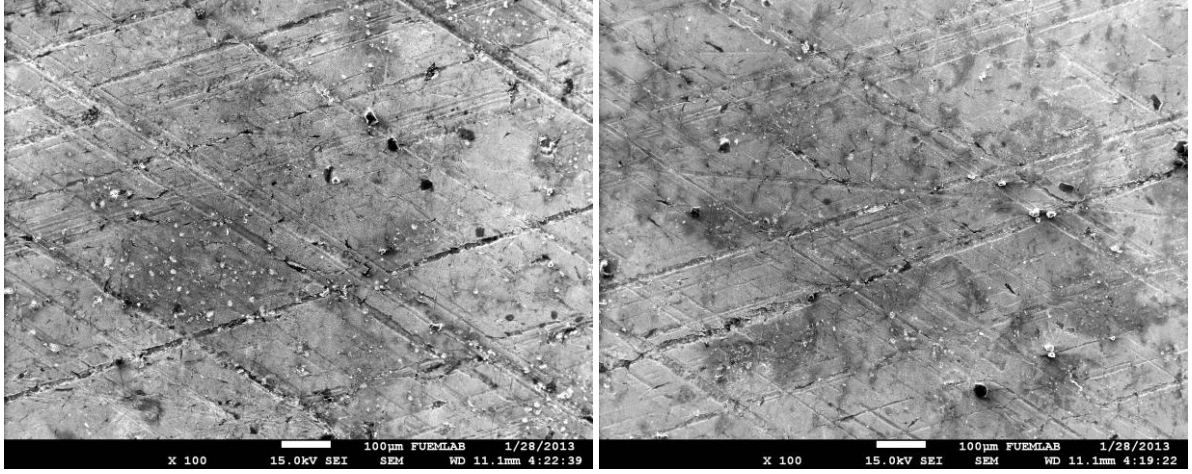
(a)



(b)

**Şekil 5.58.** Dizel ve B50 yakıtı ile çalıştırılmış pistonun X 500 büyültme ile kesiti üzerinden alınan SEM fotoğrafları (a) Dizel yakıtı ile çalışan (b) B50 yakıtı ile çalışan

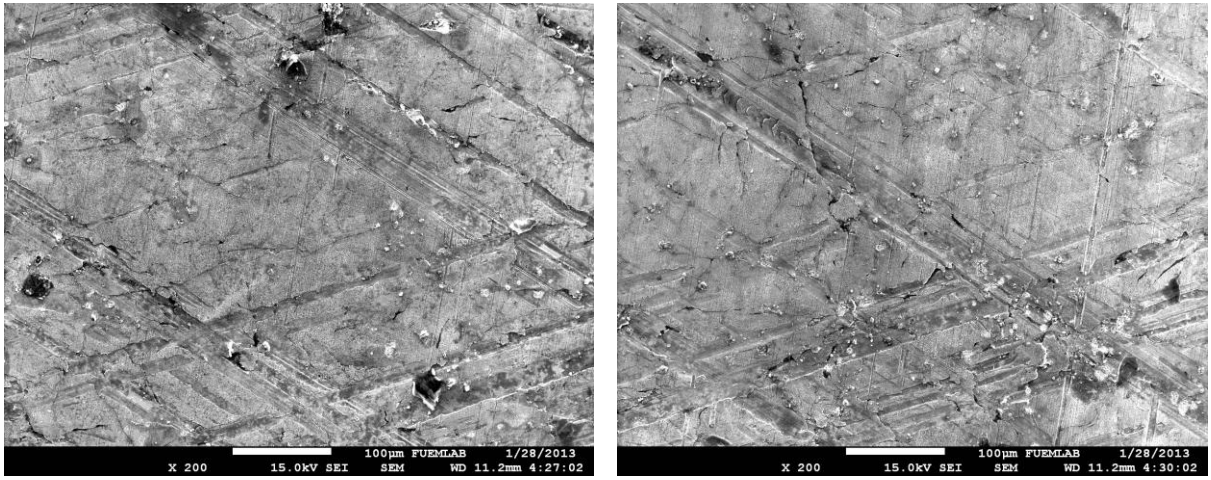
**5.6.3.1.2. B50 ve dizel yakıtı ile çalışan motorların silindir gömleği üzerindeki SEM analizleri**



(a)

(b)

**Şekil 5.59.** B50 ve Dizel yakıtı ile çalıştırılmış silindir gömleğinin X 100 büyültme ile kesiti üzerinden alınan SEM fotoğrafları (a) B50 yakıtı ile çalışan (b) Dizel yakıtı ile çalışan

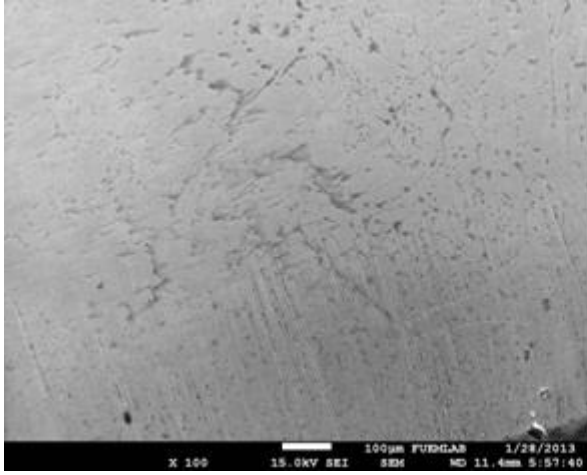


(a)

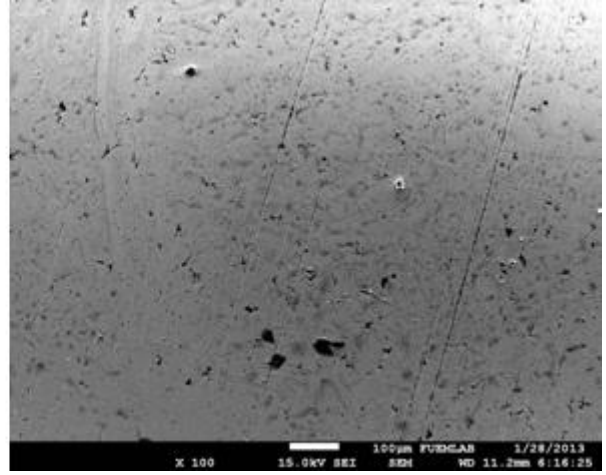
(b)

**Şekil 5.60.** B50 ve Dizel yakıtı ile çalıştırılmış silindir gömleğinin X 200 büyültme ile kesiti üzerinden alınan SEM fotoğrafları (a) B50 yakıtı ile çalışan (b) Dizel yakıtı ile çalışan

#### 5.6.3.1.3. B50 ve dizel yakıtı ile çalışan motorların segmanları üzerindeki SEM analizleri

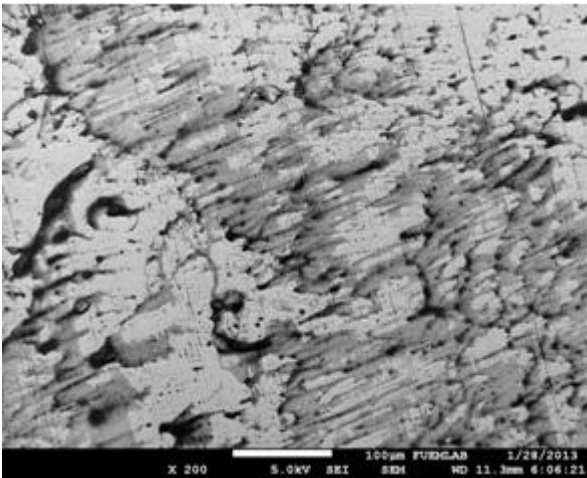


(a)

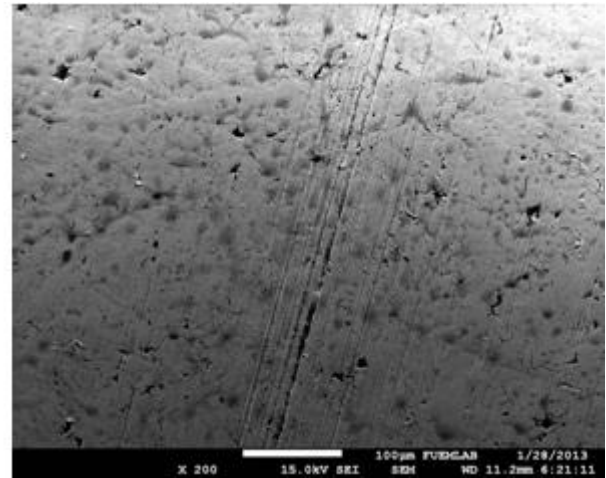


(b)

**Şekil 5.61.** B50 ve Dizel yakıtı ile çalıştırılmış segmanın X 100 büyültme ile kesiti üzerinden alınan SEM fotoğrafları (a) B50 yakıtı ile çalışan (b) Dizel yakıtı ile çalışan

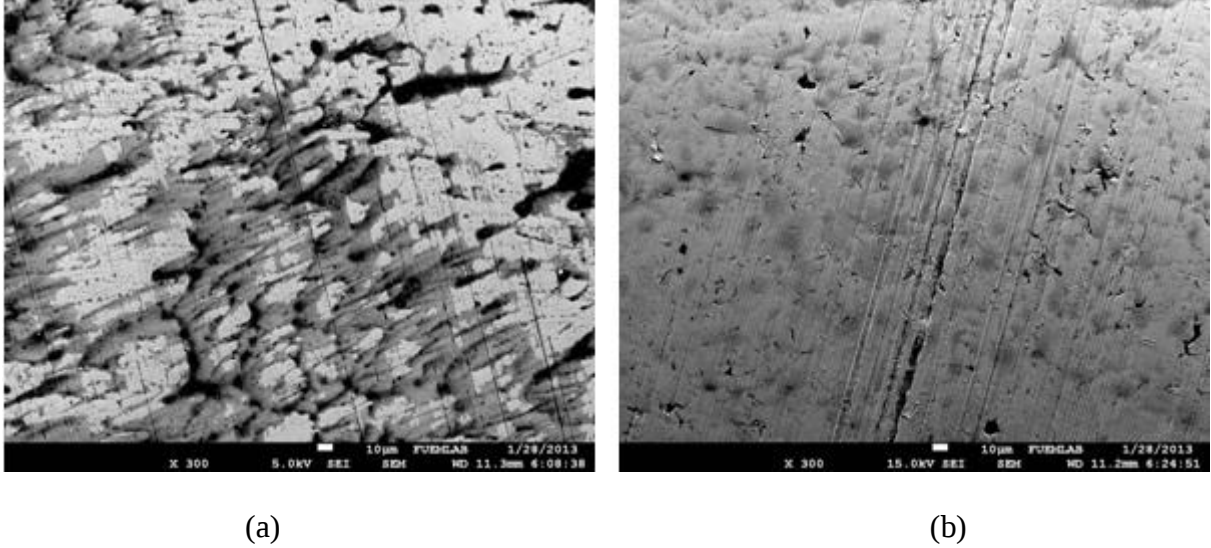


(a)



(b)

**Şekil 5.62.** B50 ve Dizel yakıtı ile çalıştırılmış segmanın X 200 büyültme ile kesiti üzerinden alınan SEM fotoğrafları (a) B50 yakıtı ile çalışan (b) Dizel yakıtı ile çalışan



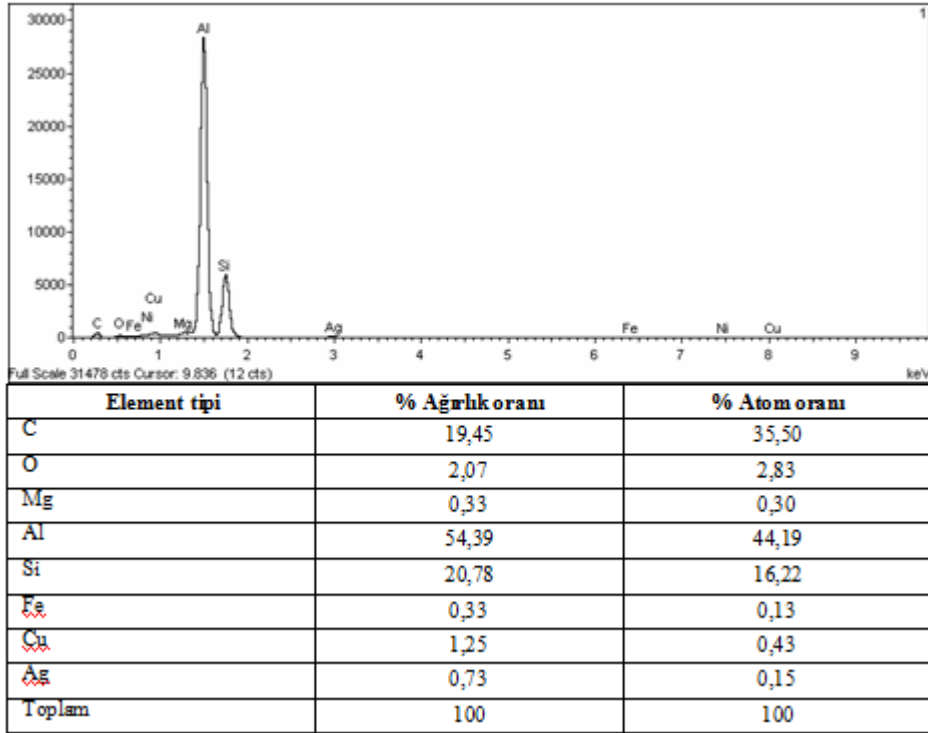
**Şekil 5.63.** Dizel ve B50 yakıtı ile çalıştırılmış segmanın X 300 büyültme ile kesiti üzerinden alınan SEM fotoğrafları (a) B50 yakıtı ile çalışan (b) Dizel yakıtı ile çalışan

Şekil 5.56-63'deki Dizel ve B50 yakıtının SEM fotoğrafları karşılaştırmalı bir şekilde sunulmuştur. SEM fotoğraflarına bakıldığında dizel yakıtı ile çalışan silindir gömleği ve segman yüzeyi üzerinde daha derin aşınma çizgilerinin olduğu görülmektedir. bu durum dizel yakıtının kimyasal yapısındaki çözücülerin yağlama yağının viskozitesini düşürmesi sonucu aşınmayı arttırmasıyla izah edilebilir. Dizel yakıtı ile çalışan silindir gömleği ve segman yüzeyi üzerinde kayma yönünde daha fazla abrasiv yarıklar da görülmektedir. SEM fotoğrafları incelendiğinde biyodizel yakıtı kullanılan silindirlerin yüzeyinin daha düzgün bir yapıya sahip olduğu görülmektedir. Özellikle motor sıcaklığının artmasıyla birlikte yağlama yağının viskozitesi düşer. Ancak biyodizel yakıtının dizel yakıtına göre daha fazla yağlama özelliğine sahip olması aşınmayı azaltıcı yönde bir etki yaptığı düşünülmektedir. Özellikle motor sıcaklığının yükselmesiyle beraber yağlama yağının viskozitesi düşer ve yağlama verimi azalır. Bu durum silindir, piston ve segman parçaları üzerinde olumsuz bir etki sağlar. Biyodizel yakıtının yağlama özelliğinin dizel yakıtına göre daha iyi olması motor parçaları üzerinde aşınma yönünde olumlu bir davranış olarak düşünülmektedir.

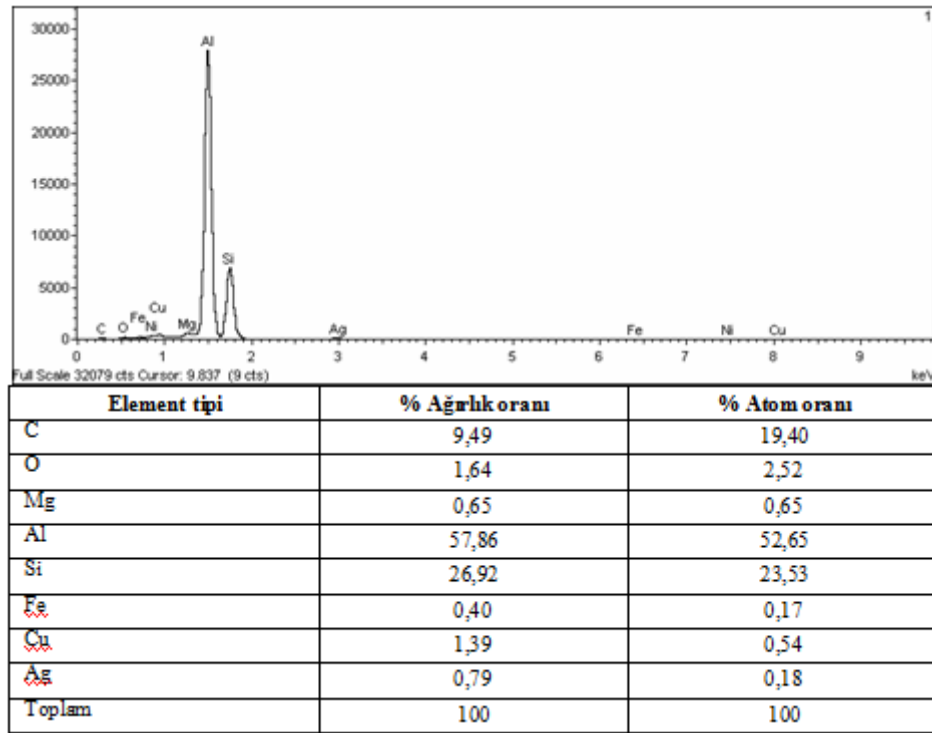
### 5.6.3.2. EDS (Energy Dispersive Spectrograf) analizleri

Herhangi bir numune veya numune üzerindeki ilgili alanın elementel kompozisyonunu tanımlamak için kullanılan bir tekniktir. Elektron mikroskopunun bir ünitesi olan EDS analizi, numune üzerine taramalı bir elektron demeti düşürülerek gerçekleştirilir. Bu elektronların bazıları numune içindeki elektronlar ile çarpışarak elektronların yörüngelerinden çıkması sebep olmaktadır. Boşalan pozisyonlar x-ışınları yayan yüksek enerjili elektron tarafından doldurulmaktadır. Yayılan x-ışınları analiz edilerek, numunenin elementel kompozisyonu tespit edilebilmektedir. Bu amaçla, B50 ve dizel yakıtı ile çalışan piston ve silindir gömleğinin karşılıklı bölgelerden alınan numunelerinin EDS analizleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen EDS analiz raporları Şekil 5.64-67'de verilmiştir.

#### 5.6.3.2.1 B50 ve dizel yakıtı ile çalışan motorların pistonları üzerindeki EDS analizleri



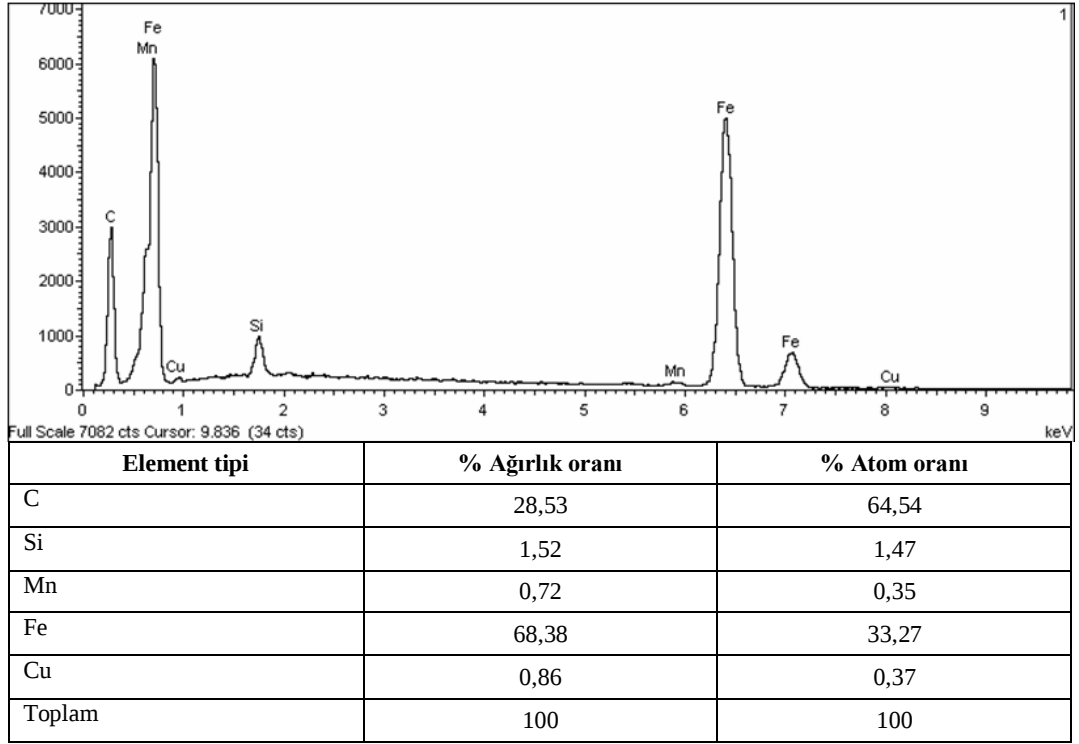
Şekil 5.64. Dizel yakıtı ile çalışan piston numunesine ait EDS analiz sonuçları



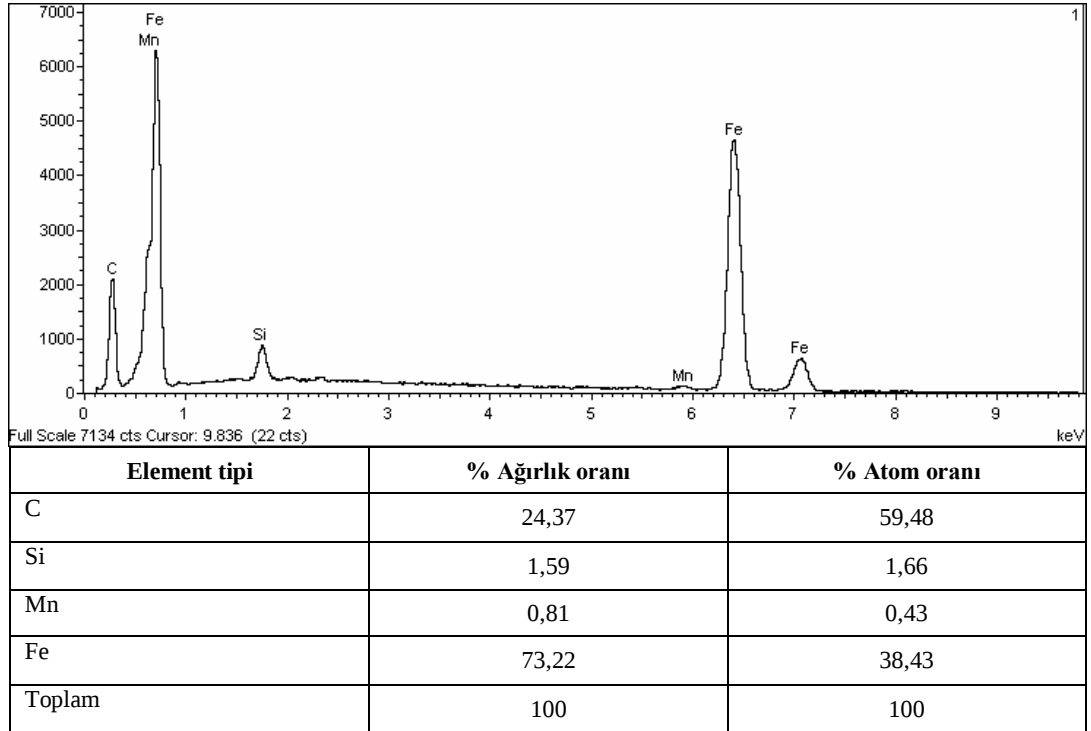
**Şekil 5.65.** B50 yakıtı ile çalışan piston numunesine ait EDS analiz sonuçları

Yapılan EDS analiz sonuçlarına göre, dizel yakıt ile çalışan piston malzemesinin element içeriği % olarak; C: 19.45, O: 2.07, Mg: 0.33, Al: 54.39, Si: 20.78, Fe: 0.33, Cu: 1.25 Ag: 0.73 olarak tespit edilirken, B50 yakıtı ile çalışan piston malzemesi üzerinden alınan analizlerde ise % olarak C: 9.49, O: 1.64, Mg: 0.65, Al: 57.86, Si: 26.92, Fe: 0.40, Cu: 1.39 Ag: 0.79 ölçülmüştür. EDS analiz sonuçları kıyaslandığında, C ve O elementlerinde bir miktar azalma, Mg, Al, Si, Fe, Cu ve Ag elementlerinde ise artış tespit edilmiştir.

**5.6.3.2.2. B50 ve dizel yakıtı ile çalışan motorların silindir gömlekleri üzerindeki EDS analizleri**



**Şekil 5.66.** Dizel yakıtı ile çalışan silindir gömleği numunesine ait EDS analiz sonuçları



**Şekil 5.67.** B50 yakıtı ile çalışan silindir gömleği numunesine ait EDS analiz sonuçları

Yapılan EDS analiz sonuçlarına göre, dizel yakıt ile çalışan silindir gömleği numunesinin element içeriği, % olarak; C: 28.53, Si: 1.52, Mn: 0.72, Fe: 68.38, Cu: 0.86 olarak tespit edilirken, B50 yakıtı ile çalışan silindir gömleği numunesi üzerinden alınan analizlerde ise % olarak; C: 24.37, Si: 1.59, Mn: 0.81, Fe: 73.22 ölçülmüştür. EDS analiz sonuçları kıyaslandığında, C elementinde bir miktar azalma, Si, Mn ve Fe elementlerinde ise çok az bir oranda artış tespit edilmiştir. Şekil 5.67-68 incelendiğinde silindir gömleklerine ait element konsantrasyonları arasında belirgin bir değişimin olmadığı görülmektedir.

## 6. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmanın temel amacı, farklı özelliklere sahip biyodizel yakıtlarının üzerine ilave edilen  $MnO_2$ , dodekanol ve propilen glikol katkı maddelerinin, bir dizel motorda, performans ve emisyon değerlerini incelemektir. Bu amaç doğrultusunda, belirtilen yağlardan NaOH ve metanol kullanılarak biyodizel üretilmiştir. Üretilen bu biyodizel (B100), yakıtları hacimsel olarak % 20, 35, 50 ve 75 oranda dizel yakıt ile karıştırılarak, dizel bir motorda performans ve emisyon testlerine tabi tutulmuştur. Katkılı çalışmada, ise üretilen beş biyodizel yakıtının B50'si üzerine Mn ve PG gibi katkı maddelerinin etkisini incelemek amaçlanmıştır. Yapılan bu çalışmalarda ulaşılan sonuçları aşağıdaki gibi özetlemek mümkündür.

Bitkisel yağlardan, (üzüm çekirdeği yağı, kayısı çekirdeği yağı, haşhaş yağı, ceviz yağı ve atık ayçiçeği yağı) asit ve baz katalizörlü transesterifikasyon reaksiyonu ile yağ asidi metil ester (biyodizel) üretilmiştir. Esterleşme reaksiyonu için metanol tercih edilmiştir. Katalizör olarak ta sodyum hidroksit (NaOH) kullanılmıştır. Kullanılan yağın %20'si kadar metanol, %0,4'ü kadar sodyum hidroksit (NaOH) tuzu kullanılmıştır. 2 saat süreyle ve 60 °C sıcaklıkta % 93-95 aralığındaki ester dönüşüm verimi ile biyodizel üretimi gerçekleştirilmiştir. Üretim için önce yağların içeriğindeki nem uzaklaştırılmıştır. Daha sonra SYA analizi yapılmıştır. Bu analiz neticesinde yağın SYA %5'in üzerinde ise önce asit katalizörlü reaksiyon daha sonra baz katalizörlü reaksiyon uygulanmıştır. SYA oranı %5'in altında olan yağlarda sadece baz katalizörlü reaksiyon işlemi gerçekleştirilmiştir.

- ÜÇYME içerikli yakıtlar, dizel yakıtının ÖYT değerleri ortalamasıyla kıyaslandığında; B20 yakıtında % 5, B35 yakıtında % 9.1, B50 yakıtında % 13.3, B75 yakıtında % 17.7 ve B100 yakıtında % 20.4 oranında bir artış tespit edilmiştir. Katkı ilaveli yakıtlar, B50 yakıtının çalışma değerlerinin ortalamasıyla kıyaslandığında; B50+20Mn $\mu$ mol/lit+PG yakıtında %1, B50+40Mn $\mu$ mol/lit+PG yakıtında %3, B50+60Mn $\mu$ mol/lit+PG yakıtında %3.05 oranında bir artış tespit edilmiştir.

- KÇYME içerikli yakıtlar, dizel yakıtının ÖYT değerleri ortalamasıyla kıyaslandığında; B20 yakıtında % 7.6, B35 yakıtında % 15.2, B50 yakıtında % 20.8, B75 yakıtında % 28 ve B100 yakıtında % 35 oranında bir artış tespit edilmiştir. Katkı ilaveli yakıtlar, B50 yakıtının çalışma değerlerinin ortalamasıyla kıyaslandığında; B50+20Mnμmol/lit+PG yakıtında %0.4, B50+40Mnμmol/lit +PG yakıtında %2, B50+60Mnμmol/lit+PG yakıtında %2.3 oranında bir azalma tespit edilmiştir.
- HYME içerikli yakıtlar, dizel yakıtının ÖYT değerleri ortalamasıyla kıyaslandığında; B20 yakıtında % 9.1, B35 yakıtında % 13.3, B50 yakıtında % 20, B75 yakıtında % 25.7 ve B100 yakıtında % 32 oranında bir artış tespit edilmiştir. Katkı ilaveli yakıtlar, B50 yakıtının çalışma değerlerinin ortalamasıyla kıyaslandığında; B50+20Mnμmol/lit+PG yakıtında %1, B50+40Mnμmol/lit+PG yakıtında % 1.65, B50+60Mnμmol/lit+PG yakıtında % 2.5 oranında bir azalma tespit edilmiştir.
- CYME içerikli yakıtlar, dizel yakıtının ÖYT değerleri ortalamasıyla kıyaslandığında; B20 yakıtında % 4.9, B35 yakıtında % 11.15, B50 yakıtında % 14.5, B75 yakıtında % 23 ve B100 yakıtında % 29.2 oranında bir artış tespit edilmiştir. Katkı ilaveli yakıtlar, B50 yakıtının çalışma değerlerinin ortalamasıyla kıyaslandığında; B50+20Mnμmol/lit+PG yakıtında % 2.5, B50+40Mnμmol/lit +PG yakıtında % 1.8, B50+60Mnμmol/lit+PG yakıtında % 2.2 oranında bir azalma tespit edilmiştir.
- AAYME içerikli yakıtlar, dizel yakıtının ÖYT değerleri ortalamasıyla kıyaslandığında; B20 yakıtında % 8.15, B35 yakıtında % 12.8, B50 yakıtında % 19.4, B75 yakıtında % 27 ve B100 yakıtında % 35.5 oranında bir artış tespit edilmiştir. Katkı ilaveli yakıtlar, B50 yakıtının çalışma değerlerinin ortalamasıyla kıyaslandığında; B50+20Mnμmol/lit+PG yakıtında % 0.5, B50+40Mnμmol/lit +PG yakıtında % 2.2, B50+60Mnμmol/lit+PG yakıtında % 2.15 oranında bir azalma tespit edilmiştir.

Dizel yakıt içerisindeki biyodizel oranının artmasıyla beraber ÖYT değerleri de o paralelde artmıştır. Bu artışın sebebi, biyodizel yakıtlarının viskozite ve yoğunluk değerlerinin yüksek, ısı değeri düşük olmasıdır. Biyodizellerin B50'si üzerine ilave edilen katkı çalışmada ise; ÖYT değerlerinin azaldığı görülmüştür. Bu azalmanın sebebi, kullanılan katkı maddelerinin ilave edildikleri yakıtın viskozite, setan sayısı, parlama noktası gibi özelliklerini iyileştirmesi olarak açıklanabilir. Mn ilavesinin en uygun değeri, CYME için

B50+20Mn $\mu$ mol/lit+PG, diğer biyodizeller için ise B50+40Mn $\mu$ mol/lit+PG olduğu görülmüştür.

- ÜÇYME içerikli yakıtlar, dizel yakıtının NO<sub>x</sub> değerleri ortalamasıyla kıyaslandığında; B20 yakıtında % 8.6, B35 yakıtında % 14.6, B50 yakıtında % 17.2, B75 yakıtında % 24.8 ve B100 yakıtında % 32.1 oranında bir artış tespit edilmiştir. Katkı ilaveli yakıtlar, B50 yakıtının NO<sub>x</sub> değerlerinin ortalamasıyla kıyaslandığında; B50+20Mn+PG yakıtında % 0.9, B50+40Mn+PG yakıtında %2.7, B50+60Mn+PG yakıtında %3.5 oranında bir azalma tespit edilmiştir.
- KÇYME içerikli yakıtlar, dizel yakıtının NO<sub>x</sub> değerleri ortalamasıyla kıyaslandığında; B20 yakıtında % 5.1, B35 yakıtında % 9.35, B50 yakıtında % 12.8, B75 yakıtında % 19.6 ve B100 yakıtında % 25.65 oranında bir artış tespit edilmiştir. Katkı ilaveli yakıtlar, B50 yakıtının NO<sub>x</sub> değerlerinin ortalamasıyla kıyaslandığında; B50+20Mn+PG yakıtında % 0.1, B50+40Mn+PG yakıtında %2.8, B50+60Mn+PG yakıtında %3 oranında bir azalma tespit edilmiştir.
- HYME içerikli yakıtlar, dizel yakıtının NO<sub>x</sub> değerleri ortalamasıyla kıyaslandığında; B20 yakıtında % 7.2, B35 yakıtında % 11, B50 yakıtında % 14.5, B75 yakıtında % 21 ve B100 yakıtında % 25.7 oranında bir artış tespit edilmiştir. Katkı ilaveli yakıtlar, B50 yakıtının NO<sub>x</sub> değerlerinin ortalamasıyla kıyaslandığında; B50+20Mn+PG yakıtında % 1.5 artış, B50+40Mn+PG yakıtında % 0.1, B50+60Mn+PG yakıtında % 0.9 oranında bir azalma tespit edilmiştir.
- CYME içerikli yakıtlar, dizel yakıtının NO<sub>x</sub> değerleri ortalamasıyla kıyaslandığında; B20 yakıtında % 14.85, B35 yakıtında % 13.1, B50 yakıtında % 17, B75 yakıtında % 21.5 ve B100 yakıtında % 26.4 oranında bir artış tespit edilmiştir. Katkı ilaveli yakıtlar, B50 yakıtının NO<sub>x</sub> değerlerinin ortalamasıyla kıyaslandığında; B50+20Mn+PG yakıtında % 1.2, B50+40Mn+PG yakıtında % 1.8, B50+60Mn+PG yakıtında % 3 oranında bir azalma tespit edilmiştir.
- AAYME içerikli yakıtlar, dizel yakıtının NO<sub>x</sub> değerleri ortalamasıyla kıyaslandığında; B20 yakıtında % 3.7, B35 yakıtında % 9.5, B50 yakıtında % 13.6, B75 yakıtında % 19.9 ve B100 yakıtında % 25.5 oranında bir artış tespit edilmiştir. Katkı ilaveli yakıtlar, B50 yakıtının NO<sub>x</sub> değerlerinin ortalamasıyla kıyaslandığında; B50+20Mn+PG yakıtında % 1, B50+40Mn+PG yakıtında % 1.7, B50+60Mn+PG yakıtında % 2.2 oranında bir artış tespit edilmiştir.

Dizel yakıt içerisindeki biyodizel oranının artmasıyla silindir içi basınç ve sıcaklık değerlerinin yüksek seviyelere ulaşması, tutuşma gecikmesi ve yanma süresi  $\text{NO}_x$  emisyonu oluşmasına neden olarak gösterilebilir. B50 yakıtına katkı maddelerinin ilave edilmesiyle setan sayısının daha yüksek, parlama noktasının ise daha düşük olmasından dolayı tutuşma gecikmesi periyodunun daha kısa sürmesi neticesinde silindirdeki basınç yükselme hızının daha yavaş olmasının yanma sonu sıcaklığını düşürdüğü ve bununla  $\text{NO}_x$  emisyonlarını azalttığı düşünülmektedir. B50 yakıtlarına ilave edilen katkı maddeleri AAYME’nde  $\text{NO}_x$  artışına sebep olurken, diğer biyodizellerde tam tersine bir düşüşe sebep olmuştur. Bu durumun, biyodizeller arasındaki kimyasal bağ yapılarındaki farklılıktan kaynaklandığı düşünülmektedir. Katkı maddeleri ilave edildikleri yakıt ile karbon, hidrojen ve oksijenden oluşan bir elektron bağ yapısı oluşturmaktadır. Kurulan bu bağ yapısı biyodizeller arasında farklılık gösterebilmektedir. Yakıtların kimyasal yapısı, Tutuşma gecikmesinin kısılmasına bağlı olarak basınç değerlerini ve yanma reaksiyonunu etkilemektedir.

- ÜÇYME içerikli yakıtlar, dizel yakıtının CO değerleri ortalamasıyla kıyaslandığında; B20 yakıtında % 33.1, B35 yakıtında % 34, B50 yakıtında % 35, B75 yakıtında % 45 ve B100 yakıtında % 51.1 oranında bir azalma tespit edilmiştir. Katkı ilaveli yakıtlar, B50 yakıtının CO değerlerinin ortalamasıyla kıyaslandığında; B50+20Mn+PG yakıtında %9.9, B50+40Mn+PG yakıtında %20.1, B50+60Mn+PG yakıtında %30.4 oranında bir azalma tespit edilmiştir.
- KÇYME içerikli yakıtlar, dizel yakıtının CO değerleri ortalamasıyla kıyaslandığında; B20 yakıtında % 38, B35 yakıtında % 39.5, B50 yakıtında % 42.8, B75 yakıtında % 46 ve B100 yakıtında % 53.5 oranında bir azalma tespit edilmiştir. Katkı ilaveli yakıtlar, B50 yakıtının CO değerlerinin ortalamasıyla kıyaslandığında; B50+20Mn+PG yakıtında % 5, B50+40Mn+PG yakıtında % 14.9, B50+60Mn+PG yakıtında % 22 oranında bir azalma tespit edilmiştir.
- HYME içerikli yakıtlar, dizel yakıtının CO değerleri ortalamasıyla kıyaslandığında; B20 yakıtında % 41.5, B35 yakıtında % 39.7, B50 yakıtında % 42.8, B75 yakıtında % 44 ve B100 yakıtında % 45.1 oranında bir azalma tespit edilmiştir. Katkı ilaveli yakıtlar, B50 yakıtının CO değerlerinin ortalamasıyla kıyaslandığında; B50+20Mn+PG yakıtında % 5.2, B50+40Mn+PG yakıtında % 18.8, B50+60Mn+PG yakıtında % 24 oranında bir azalma tespit edilmiştir.

- CYME içerikli yakıtlar, dizel yakıtının CO değerleri ortalamasıyla kıyaslandığında; B20 yakıtında % 48.1, B35 yakıtında % 44.2, B50 yakıtında % 43.7 B75 yakıtında % 45 ve B100 yakıtında % 44.2 oranında bir azalma tespit edilmiştir. Katkı ilaveli yakıtlar, B50 yakıtının CO değerlerinin ortalamasıyla kıyaslandığında; B50+20Mn+PG yakıtında % 1, B50+40Mn+PG yakıtında % 15, B50+60Mn+PG yakıtında % 25 oranında bir azalma tespit edilmiştir.
- AAYME içerikli yakıtlar, dizel yakıtının CO değerleri ortalamasıyla kıyaslandığında; B20 yakıtında % 48, B35 yakıtında % 45, B50 yakıtında % 47.5, B75 yakıtında % 47 ve B100 yakıtında % 47.5 oranında bir azalma tespit edilmiştir. Katkı ilaveli yakıtlar, B50 yakıtının CO değerlerinin ortalamasıyla kıyaslandığında; B50+20Mn+PG yakıtında % 7, B50+40Mn+PG yakıtında % 12, B50+60Mn+PG yakıtında % 15 oranında bir azalma tespit edilmiştir.

Ek oksijen yakıtın yanma performansını iyileştirmesiyle CO emisyonları azalmaktadır. Bununla beraber yakıtlardaki biyodizel oranın artmasıyla CO emisyonları azalmıştır. B50 yakıtına ilave edilen katkı maddeleri oksijen bakımından zengin olduğu için CO emisyonlarının daha da azalmasına katkı sağlamıştır.

- ÜÇYME içerikli yakıtlar, dizel yakıtının HC değerleri ortalamasıyla kıyaslandığında; B20 yakıtında % 40.5, B35 yakıtında % 50.6, B50 yakıtında % 55.3, B75 yakıtında % 60.5 ve B100 yakıtında % 74.9 oranında bir azalma tespit edilmiştir. Katkı ilaveli yakıtlar, B50 yakıtının HC değerlerinin ortalamasıyla kıyaslandığında; B50+20Mn+PG yakıtında %6.25, B50+40Mn+PG yakıtında %10, B50+60Mn+PG yakıtında %15 oranında bir azalma tespit edilmiştir.
- KÇYME içerikli yakıtlar, dizel yakıtının HC değerleri ortalamasıyla kıyaslandığında; B20 yakıtında % 44.5, B35 yakıtında % 50, B50 yakıtında % 53.5, B75 yakıtında % 60.1 ve B100 yakıtında % 65 oranında bir azalma tespit edilmiştir. Katkı ilaveli yakıtlar, B50 yakıtının HC değerlerinin ortalamasıyla kıyaslandığında; B50+20Mn+PG yakıtında % 4.9, B50+40Mn+PG yakıtında % 16.1, B50+60Mn+PG yakıtında % 15.6 oranında bir azalma tespit edilmiştir.
- HYME içerikli yakıtlar, dizel yakıtının HC değerleri ortalamasıyla kıyaslandığında; B20 yakıtında % 50, B35 yakıtında % 59.3, B50 yakıtında % 55.4, B75 yakıtında % 60.4 ve B100 yakıtında % 62.6 oranında bir azalma tespit edilmiştir. Katkı ilaveli yakıtlar, B50 yakıtının HC değerlerinin ortalamasıyla kıyaslandığında;

B50+20Mn+PG yakıtında % 11, B50+40Mn+PG yakıtında % 16.4, B50+60Mn+PG yakıtında % 17.5 oranında bir azalma tespit edilmiştir.

- CYME içerikli yakıtlar, dizel yakıtının HC değerleri ortalamasıyla kıyaslandığında; B20 yakıtında % 44.9, B35 yakıtında % 52, B50 yakıtında % 53.5, B75 yakıtında % 59.1 ve B100 yakıtında % 70.1 oranında bir azalma tespit edilmiştir. Katkı ilaveli yakıtlar, B50 yakıtının HC değerlerinin ortalamasıyla kıyaslandığında; B50+20Mn+PG yakıtında % 25, B50+40Mn+PG yakıtında % 25, B50+60Mn+PG yakıtında % 30 oranında bir azalma tespit edilmiştir.
- AAYME içerikli yakıtlar, dizel yakıtının HC değerleri ortalamasıyla kıyaslandığında; B20 yakıtında % 46.6, B35 yakıtında % 53.5, B50 yakıtında % 59, B75 yakıtında % 64 ve B100 yakıtında % 67 oranında bir azalma tespit edilmiştir. Katkı ilaveli yakıtlar, B50 yakıtının HC değerlerinin ortalamasıyla kıyaslandığında; B50+20Mn+PG yakıtında % 13.5, B50+40Mn+PG yakıtında % 26.3, B50+60Mn+PG yakıtında % 25.4 oranında bir azalma tespit edilmiştir.

Biyodizel yakıtlarının oksijen içeriğinin fazla olması yanma reaksiyonuna ek katkı sağlayarak, HC emisyonlarının azalmasına neden olmaktadır. Düşük yük şartlarında HC emisyonları arasında belirgin bir fark oluşmamıştır. Yükün arttırılmasıyla HC emisyonları arasındaki fark belirginleşmiştir. Bu durum, yükün artmasıyla beraber yanma için ayrılan sürenin kısılması sebebine bağlanmıştır. B50 yakıtına ilave edilen katkı maddeleri oksijen bakımından zengin olduğu için HC emisyonlarının daha da azalmasına katkı sağlamıştır.

- ÜÇYME içerikli yakıtlar, dizel yakıtının CO<sub>2</sub> değerleri ortalamasıyla kıyaslandığında; B20 yakıtında % 1.4, B35 yakıtında % 2.35, B50 yakıtında % 2.4, B75 yakıtında % 2.52 ve B100 yakıtında % 2.7 oranında bir artış tespit edilmiştir. Katkı ilaveli yakıtlar, B50 yakıtının CO<sub>2</sub> değerlerinin ortalamasıyla kıyaslandığında; B50+20Mn+PG yakıtında %2.5, B50+40Mn+PG yakıtında %5.3, B50+60Mn+PG yakıtında %8 oranında bir artış tespit edilmiştir.
- KÇYME içerikli yakıtlar, dizel yakıtının CO<sub>2</sub> değerleri ortalamasıyla kıyaslandığında; B20 yakıtında % 1, B35 yakıtında % 0.1, B50 yakıtında % 1.9, B75 yakıtında % 3.8 ve B100 yakıtında % 6.3 oranında bir artış tespit edilmiştir. Katkı ilaveli yakıtlar, B50 yakıtının CO<sub>2</sub> değerlerinin ortalamasıyla kıyaslandığında; B50+20Mn+PG

yakıtında % 5.9, B50+40Mn+PG yakıtında % 7.55, B50+60Mn+PG yakıtında % 12.8 oranında bir artış tespit edilmiştir.

- HYME içerikli yakıtlar, dizel yakıtının CO<sub>2</sub> değerleri ortalamasıyla kıyaslandığında; B20 yakıtında % 1.1, B35 yakıtında % 1.9, B50 yakıtında % 2.6, B75 yakıtında % 2.8 ve B100 yakıtında % 2.6 oranında bir artış tespit edilmiştir. Katkı ilaveli yakıtlar, B50 yakıtının CO<sub>2</sub> değerlerinin ortalamasıyla kıyaslandığında; B50+20Mn+PG yakıtında % 2.2, B50+40Mn+PG yakıtında % 4.3, B50+60Mn+PG yakıtında % 4.95 oranında bir artış tespit edilmiştir.
- CYME içerikli yakıtlar, dizel yakıtının CO<sub>2</sub> değerleri ortalamasıyla kıyaslandığında; B20 yakıtında % 1.5, B35 yakıtında % 2.1, B50 yakıtında % 4.4, B75 yakıtında % 4.8 ve B100 yakıtında % 8 oranında bir artış tespit edilmiştir. Katkı ilaveli yakıtlar, B50 yakıtının CO<sub>2</sub> değerlerinin ortalamasıyla kıyaslandığında; B50+20Mn+PG yakıtında % 2.9, B50+40Mn+PG yakıtında % 5.4, B50+60Mn+PG yakıtında % 8.1 oranında bir artış tespit edilmiştir.
- AAYME içerikli yakıtlar, dizel yakıtının CO<sub>2</sub> değerleri ortalamasıyla kıyaslandığında; B20 yakıtında % 0.8, B35 yakıtında % 1.15, B50 yakıtında % 4, B75 yakıtında % 3 ve B100 yakıtında % 4.3 oranında bir artış tespit edilmiştir. Katkı ilaveli yakıtlar, B50 yakıtının CO<sub>2</sub> değerlerinin ortalamasıyla kıyaslandığında; B50+20Mn+PG yakıtında % 4.1, B50+40Mn+PG yakıtında % 6.3, B50+60Mn+PG yakıtında % 8.55 oranında bir artış tespit edilmiştir.

Yanma esnasında biyodizelin kimyasal yapısında bulunan oksijen CO ile reaksiyona girerek CO<sub>2</sub> gazını oluşturmakta, bu reaksiyon CO<sub>2</sub> emisyonunun artmasına sebep olmuştur. B50'ye ilave edilen katkı maddeleri, elde edilen yakıt numunelerinin oksijen bakımından zengin bir içeriğe sahip olmasını sağlamıştır. Belirtilen bu yakıt numunelerinin egzoz çıkış sıcaklığı değerleri de göstermiştir ki, oksijen içerikli yakıtların silindir içi sıcaklığı yüksektir. Bu sıcaklığın yüksek olması yanma verimini iyileştirmektedir. İyi bir yanmanın olduğunu özgül yakıt tüketim değerleri de desteklemektedir. Yüksek sıcaklıkta gerçekleşen yanma reaksiyonu CO<sub>2</sub> emisyonlarının oluşumunu tetiklemiştir.

- ÜÇYME içerikli yakıtlar, dizel yakıtının O<sub>2</sub> değerleri ortalamasıyla kıyaslandığında; B20 yakıtında % 6.5, B35 yakıtında % 7.5, B50 yakıtında % 8.3, B75 yakıtında % 9.2 ve B100 yakıtında % 10.8 oranında bir artış tespit edilmiştir. Katkı ilaveli

yakıtlar, B50 yakıtının O<sub>2</sub> değerlerinin ortalamasıyla kıyaslandığında; B50+20Mn+PG yakıtında %0.4, B50+40Mn+PG yakıtında %2.9, B50+60Mn+PG yakıtında %5.3 oranında bir artış tespit edilmiştir.

- KÇYME içerikli yakıtlar, dizel yakıtının O<sub>2</sub> değerleri ortalamasıyla kıyaslandığında; B20 yakıtında % 0.9, B35 yakıtında % 2, B50 yakıtında % 3.1, B75 yakıtında % 4.3 ve B100 yakıtında % 5 oranında bir artış tespit edilmiştir. Katkı ilaveli yakıtlar, B50 yakıtının O<sub>2</sub> değerlerinin ortalamasıyla kıyaslandığında; B50+20Mn+PG yakıtında % 4.4, B50+40Mn+PG yakıtında % 6.9, B50+60Mn+PG yakıtında %9.6 oranında bir artış tespit edilmiştir.
- HYME içerikli yakıtlar, dizel yakıtının O<sub>2</sub> değerleri ortalamasıyla kıyaslandığında; B20 yakıtında % 1.75, B35 yakıtında % 1.75, B50 yakıtında % 3.45, B75 yakıtında % 3.9 ve B100 yakıtında % 4.5 oranında bir artış tespit edilmiştir. Katkı ilaveli yakıtlar, B50 yakıtının O<sub>2</sub> değerlerinin ortalamasıyla kıyaslandığında; B50+20Mn+PG yakıtında % 3.1, B50+40Mn+PG yakıtında % 5.6, B50+60Mn+PG yakıtında % 8.25 oranında bir artış tespit edilmiştir.
- CYME içerikli yakıtlar, dizel yakıtının O<sub>2</sub> değerleri ortalamasıyla kıyaslandığında; B20 yakıtında % 2, B35 yakıtında % 1.85, B50 yakıtında % 1.75, B75 yakıtında % 4 ve B100 yakıtında % 5.15 oranında bir artış tespit edilmiştir. Katkı ilaveli yakıtlar, B50 yakıtının O<sub>2</sub> değerlerinin ortalamasıyla kıyaslandığında; B50+20Mn+PG yakıtında % 6.5, B50+40Mn+PG yakıtında % 9.2, B50+60Mn+PG yakıtında % 10.75 oranında bir artış tespit edilmiştir.
- AAYME içerikli yakıtlar, dizel yakıtının O<sub>2</sub> değerleri ortalamasıyla kıyaslandığında; B20 yakıtında % 2, B35 yakıtında % 1.65, B50 yakıtında % 2.4, B75 yakıtında % 4.1 ve B100 yakıtında % 4.5 oranında bir artış tespit edilmiştir. Katkı ilaveli yakıtlar, B50 yakıtının O<sub>2</sub> değerlerinin ortalamasıyla kıyaslandığında; B50+20Mn+PG yakıtında % 2.7, B50+40Mn+PG yakıtında % 4.6, B50+60Mn+PG yakıtında % 5.2 oranında bir artış tespit edilmiştir.

Tüm test yakıtları için motordaki yük artıkça O<sub>2</sub> emisyonlarında azalma gözlemlenmiştir. Tüm yakıt türleri için düşük yük şartlarında yüksek olan O<sub>2</sub> miktarı yüklemenin artmasıyla orantılı olarak düşmüştür. %20 yük durumunda CO<sub>2</sub> emisyonunda olduğu gibi numuneler arasında belirgin bir farklılık görülmemektedir. Bunun sebebi CO<sub>2</sub> de belirtildiği gibi, optimum yanma verimin sağlanmasıdır. Dizel yakıt ve biyodizel karışımli yakıtlar karşılaştırıldığında, O<sub>2</sub> emisyonu değerleri birbirlerine çok yakın değerde seyrettiği

görülmektedir. Bu durum biyodizelin oksijen içermesine rağmen gerçekleşmiştir. Gerçekleşen bu durumun, CO<sub>2</sub> emisyon değerlerinin daha yüksek olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Yani yanma sırasında biyodizelin daha fazla karbon atomu oksitlediği ve bundan dolayı O<sub>2</sub> salınımının daha düşük çıktığı söylenebilir.

- ÜÇYME içerikli yakıtlar, dizel yakıtının duman emisyon değerleri ortalamasıyla kıyaslandığında; B20 yakıtında % 25, B35 yakıtında % 29, B50 yakıtında % 35.2, B75 yakıtında % 49 ve B100 yakıtında % 61 oranında bir azalma tespit edilmiştir. Katkı ilaveli yakıtlar, B50 yakıtının duman emisyon değerlerinin ortalamasıyla kıyaslandığında; B50+20Mn+PG yakıtında %25.8, B50+40Mn +PG yakıtında %33.7, B50+60Mn+PG yakıtında %38.1 oranında bir azalma tespit edilmiştir.
- KÇYME içerikli yakıtlar, dizel yakıtının duman emisyon değerleri ortalamasıyla kıyaslandığında; B20 yakıtında % 19.5, B35 yakıtında % 35, B50 yakıtında % 48.5, B75 yakıtında % 60 ve B100 yakıtında % 67.5 oranında bir azalma tespit edilmiştir. Katkı ilaveli yakıtlar, B50 yakıtının duman emisyon değerlerinin ortalamasıyla kıyaslandığında; B50+20Mn+PG yakıtında % 14, B50+40Mn+PG yakıtında %23.5, B50+60Mn+PG yakıtında % 28.5 oranında bir azalma tespit edilmiştir.
- HYME içerikli yakıtlar, dizel yakıtının duman emisyon değerleri ortalamasıyla kıyaslandığında; B20 yakıtında % 19.5, B35 yakıtında % 21.25, B50 yakıtında % 33.1, B75 yakıtında % 42.5 ve B100 yakıtında % 51 oranında bir azalma tespit edilmiştir. Katkı ilaveli yakıtlar, B50 yakıtının duman emisyon değerlerinin ortalamasıyla kıyaslandığında; B50+20Mn+PG yakıtında % 27, B50+40Mn +PG yakıtında % 33.7, B50+60Mn+PG yakıtında % 37.5 oranında bir azalma tespit edilmiştir.
- CYME içerikli yakıtlar, dizel yakıtının duman emisyon değerleri ortalamasıyla kıyaslandığında; B20 yakıtında % 22.5, B35 yakıtında % 28.5, B50 yakıtında % 41.4, B75 yakıtında % 41.8 ve B100 yakıtında % 53 oranında bir azalma tespit edilmiştir. Katkı ilaveli yakıtlar, B50 yakıtının duman emisyon değerlerinin ortalamasıyla kıyaslandığında; B50+20Mn+PG yakıtında % 23.4, B50+40Mn +PG yakıtında % 33, B50+60Mn+PG yakıtında % 30.8 oranında bir azalma tespit edilmiştir.
- AAYME içerikli yakıtlar, dizel yakıtının duman emisyon değerleri ortalamasıyla kıyaslandığında; B20 yakıtında % 12, B35 yakıtında % 20.8, B50 yakıtında % 25,

B75 yakıtında % 34.5 ve B100 yakıtında % 46 oranında bir azalma tespit edilmiştir. Katkı ilaveli yakıtlar, B50 yakıtının duman emisyon değerlerinin ortalamasıyla kıyaslandığında; B50+20Mn+PG yakıtında % 24.5, B50+40Mn +PG yakıtında % 32.1, B50+60Mn+PG yakıtında % 35.25 oranında bir azalma tespit edilmiştir.

Biyodizel içerikli numunelerin duman salınımlarının dizel yakıtına göre düşük çıkmasının nedeni biyodizelin oksijen içermesidir. Oksijen içerikli yakıtlar silindir içi sıcaklığı arttırmaktadır. Bu artış yanma verimini olumlu etkileyerek bölgesel sıcaklık değişimini önlemektedir. B50 yakıtının  $MnO_2$ , propilen glikol ve dodekanol gibi katkı maddeleriyle desteklenmesi, oksijen içeriğine bağlı olarak yanma sırasında oksitlenme reaksiyonu hızlandırarak duman oluşumu azaltmıştır. Ayrıca yakıtta ilave edilen katkı maddeleri yanma reaksiyonuna istikrarlı bir yapı kazandırıp, alev içerisinde türbülanslı karışım alanları ve duman emisyonları oluşmasını engellemiştir.

- ÜÇYME içerikli yakıtlar, dizel yakıtının egzoz çıkış sıcaklığı değerleri ortalamasıyla kıyaslandığında; B20 yakıtında %6, B35 yakıtında %9.9, B50 yakıtında %12.35, B75 yakıtında %16.7 ve B100 yakıtında %20.6 oranında bir artış tespit edilmiştir. Katkı ilaveli yakıtlar, B50 yakıtının egzoz çıkış sıcaklığı değerlerinin ortalamasıyla kıyaslandığında; B50+20Mn+PG yakıtında %3.5, B50+40Mn+PG yakıtında %7.6, B50+60Mn+PG yakıtında %8.8 oranında bir artış tespit edilmiştir.
- KÇYME içerikli yakıtlar, dizel yakıtının egzoz çıkış sıcaklığı değerleri ortalamasıyla kıyaslandığında; B20 yakıtında % 8.5, B35 yakıtında % 10, B50 yakıtında % 14, B75 yakıtında %18.5 ve B100 yakıtında % 21.5 oranında bir artış tespit edilmiştir. Katkı ilaveli yakıtlar, B50 yakıtının egzoz çıkış sıcaklığı değerlerinin ortalamasıyla kıyaslandığında; B50+20Mn+PG yakıtında % 4.1, B50+40Mn+PG yakıtında % 8, B50+60Mn+PG yakıtında %8.15 oranında bir artış tespit edilmiştir.
- HYME içerikli yakıtlar, dizel yakıtının egzoz çıkış sıcaklığı değerleri ortalamasıyla kıyaslandığında; B20 yakıtında % 7, B35 yakıtında % 12.5, B50 yakıtında % 14, B75 yakıtında % 18.35 ve B100 yakıtında % 21.5 oranında bir artış tespit edilmiştir. Katkı ilaveli yakıtlar, B50 yakıtının egzoz çıkış sıcaklığı değerlerinin ortalamasıyla kıyaslandığında; B50+20Mn+PG yakıtında % 7.85, B50+40Mn+PG yakıtında % 10, B50+60Mn+PG yakıtında % 9.2 oranında bir artış tespit edilmiştir.

- CYME içerikli yakıtlar, dizel yakıtının egzoz çıkış sıcaklığı değerleri ortalamasıyla kıyaslandığında; B20 yakıtında % 9, B35 yakıtında % 12.4, B50 yakıtında % 15.9, B75 yakıtında % 20.1 ve B100 yakıtında % 22.9 oranında bir artış tespit edilmiştir. Katkı ilaveli yakıtlar, B50 yakıtının egzoz çıkış sıcaklığı değerlerinin ortalamasıyla kıyaslandığında; B50+20Mn+PG yakıtında % 3.2, B50+40Mn+PG yakıtında % 2.2, B50+60Mn+PG yakıtında % 2.25 oranında bir artış tespit edilmiştir.
- AAYME içerikli yakıtlar, dizel yakıtının egzoz çıkış sıcaklığı değerleri ortalamasıyla kıyaslandığında; B20 yakıtında %6.75, B35 yakıtında % 9.9, B50 yakıtında % 12.7, B75 yakıtında %15.1 ve B100 yakıtında % 18.5 oranında bir artış tespit edilmiştir. Katkı ilaveli yakıtlar, B50 yakıtının egzoz çıkış sıcaklığı değerlerinin ortalamasıyla kıyaslandığında; B50+20Mn+PG yakıtında %2, B50+40Mn+PG yakıtında % 3.6, B50+60Mn+PG yakıtında % 3.6 oranında bir artış tespit edilmiştir.

Motordaki yükün artmasıyla beraber bütün yakıt numuneleri için egzoz çıkış sıcaklığında artışlar gözlenmiştir. Dizel ile biyodizel içerikli yakıtların egzoz emisyon değerlerindeki farklılığın temel nedeni, biyodizel yakıtlarının oksijen içermesi ve setan sayısının yüksek olmasıdır. B50 yakıtının Mn, propilen glikol ve dodekanol gibi katkı maddeleriyle desteklenmesi, egzoz çıkış sıcaklık değerlerini arttırmıştır. Bu durum kaliteli bir yanmanın neticesidir. Katkı maddelerinin ilave edilmesinin temel amacı yakıtın kimyasal ve fiziksel özelliklerini iyileştirmek suretiyle, yanma performansını güçlendirmektir. İyi bir yanma karakteristiği, her zaman egzoz çıkış sıcaklığının yüksek değerlere ulaşmasına sebep olmaktadır.

1. Mn, propilen glikol ve dodekanol gibi katkı maddelerinin daha az C atomu oluşturması, yapısında oksijen bulundurması ve B50 yakıtına göre daha küçük moleküler yapıya sahip olması yanma reaksiyonuna olumlu bir katkı sağlamıştır.
2. Biyodizelin alt ısı değeri dizel yakıtı ile kıyaslandığında düşük olması özgül yakıt tüketimini arttırmakta motor performansını düşürmektedir.
3. Kullanılan Mn katkı maddesinin en uygun dozlama miktarının biyodizelin kimyasal yapısına göre değişiklik gösterdiği tespit edilmiştir.
4. Mn ilavesinin yakıtın setan sayısı üzerinde olumlu etki yapmaktadır.

5. Kullanılan katkı maddeleri yakıtın viskozite, yoğunluk, setan sayısı ve parlama noktası gibi özelliklerini iyileştirdiği tespit edilmiştir.

6. Biyodizelin ve katkı maddelerinin içeriğindeki oksijen miktarı silindir içi sıcaklığı arttırmaktadır.

Yapılan deneysel çalışmalar, üretilen bu biyodizel yakıtlarının ve bu yakıtlardan elde edilen karışımların, direk püskürtmeli dizel motorlarında modifikasyonsuz bir şekilde dizel yakıtı yerine kullanılabileceğini göstermiştir.

B50 yakıtı ile 100 saatlik çalışma sonunda motorun genel görünümü dizel yakıtı ile çalışmaya benzer durumda olduğu görülmüştür. Yani yanma odası islenmiş fakat motordaki çalışma verimini etkileyecek seviyede bir kurum tabakası oluşmamıştır. B50 yakıtı 100 saat boyunca deney motorunda sorunsuz bir şekilde kullanılmıştır. 100 saatlik çalışma sonunda motor söküldüğünde yanma odası, piston üst tablası, silindir cidarları ve supaplarda dizel yakıtı ile çalışmaya göre benzer birikintilerin olduğu görülmüştür. B50 yakıtı ile çalışan motor parçalarının üzerindeki birikintinin motor elemanlarına az da olsa yapıştığı ve renk farklılığıdır. Dizel yakıtı ile çalışmada oluşan is siyah parlak bir renkte iken, B50 yakıtında gri ve mat bir renkte oluşmuştur. Bununla beraber B50 ile 100 saat boyunca ilk hareket problemi olmamış, segman yapışmasına ve kırılmasına rastlanılmamış, egzoz supabında ve yanma odasının bazı bölgelerinde daha fazla birikinti görülmüş ve supaplarda herhangi bir hasara rastlanılmamıştır. Dizel yakıtı ile çalışan silindir gömleği ve segman yüzeyi üzerinde daha derin aşınma çizgilerinin olduğu görülmektedir. bu durum dizel yakıtının kimyasal yapısındaki çözücülerin yağlama yağının viskozitesini düşürmesi sonucu aşınmayı arttırmasıyla izah edilebilir. Dizel yakıtı ile çalışan silindir gömleği ve segman yüzeyi üzerinde kayma yönünde daha fazla abrasiv yarıklar da görülmektedir. SEM fotoğrafları incelendiğinde biyodizel yakıtı kullanılan silindirlerin yüzeyinin daha düzgün bir yapıya sahip olduğu görülmektedir. Özellikle motor sıcaklığının artmasıyla birlikte yağlama yağının viskozitesi düşer. Ancak biyodizel yakıtının dizel yakıtına göre daha fazla yağlama özelliğine sahip olması aşınmayı azaltıcı yönde bir etki yaptığı düşünülmektedir. Özellikle motor sıcaklığının yükselmesiyle beraber yağlama yağının viskozitesi düşer ve yağlama verimi azalır. Bu durum silindir, piston ve segman parçaları üzerinde olumsuz bir etki sağlar. Biyodizel yakıtının yağlama özelliğinin dizel yakıtına göre daha iyi olması bu parçalar üzerinde aşınma yönünde olumlu bir davranış olarak düşünülmektedir.

## 7. ÖNERİLER

1. Biyodizeli üretmek ve kullanmak için Türkiye yeterli ve uygun alt yapıya sahiptir. Türkiye’de kolza (kanola), ayçiçeği, soya, aspir gibi yağlı tohum bitkilerinin enerji amaçlı tarımı mümkündür. Bu durum, tarım sektörüne ciddi bir hareket kazandırabilir. Kışı ılıman geçen bölgelerimizde kanola ikinci ürün olarak da ekilebilir. Tarımı sorunsuz ve maliyeti buğday ve ayçiçeğinden az olan kanolanın, türk çiftçisi için önemli bir kurtarıcı olacağı düşünülmektedir. Ayrıca yemeklik yağ statüsünde olmayan ve tarım alanlarını işgal etmeden üretilebilen yağlı ürünlerin (alg ve yosun türleri) yetiştiriciliği teşvik edilebilir. Bu sayede gıda olarak kullanılmayan yağların biyodizel üretiminde tercih edilmesi ekonomik ve çevresel avantajlar sağlayacaktır.
2. Daha iyi bir motor performansı ve daha az yakıt sarfiyatı değerlerini sağlayabilmek açısından; B5, B10 ve B15 yakıtlarının dizel bir motordaki performansı denenebilir.
3. Farklı türde metal bazlı katkı maddelerinin yakıtın kimyasal özellikleri üzerine etkisi, kimyasal ortamda analiz edilerek en uygun katkı ve o katkının miktarı incelenebilir.
4. Daha uygun laboratuvar şartları oluşturulursa kullanılan katkı maddelerinin etkisi birbirinden bağımsız olarak incelenebilir.
5. Test yakıtları farklı günlerde test edildiği için birbirleri arasındaki karşılaştırma hassasiyeti etkilenmiş olabilir.
6. Çalışma ortamının sıcaklığı ve nemi gibi motor karakteristik ve egzoz emisyonu değerleri üzerinde oldukça önemli olan faktörlerin sabitlenmesi için gerekli laboratuvar şartlarının yetersiz oluşu da sonuçların kesin bir ifade ile açıklanmasını güçleştirmektedir.

## KAYNAKÇA

- [1] **Hazar, H.**, 2009. Effects of biodiesel on a low heat loss diesel engine, *Renewable Energy*, **34**, 1533–1537.
- [2] **Hazar, H.**, 2008. Kanola metil esterin dizel motorunun performansına ve emisyon karakteristiklerine etkilerinin belirlenmesi, *Doğu Anadolu Bölgesi Araştırmaları*, 60-65.
- [3] **Mazed, M.A.**, 1984. Test of vegetable oil as fuel in direct and indirect injection diesel engine, *Ph.D.Thesis*, Oklahoma State University, ABD.
- [4] **Behçet, R. ve Çakmak, A.V.**, 2011. Bir dizel motorda yakıt olarak kullanılan balık yağı metil esteri karışımlarının motor performans ve emisyonlarına etkisi, *6th International Advanced Technologies Symposium (IATS'11)*, 16-18 Mayıs, Elazığ, Turkey, 161-165.
- [5] **Gürü, M., Koca, A., Can, Ö., Çakır, C. and Şahin, F.**, 2010. Biodiesel production from waste chicken fat based sources and evaluation with Mg based additive in a diesel engine, *Renewable Energy*, **35**, 637–643.
- [6] **Altun, Ş.**, 2009. Hayvansal yağlardan biyo-yakıt üretimi ve bir dizel motorunda kullanılabilirliğinin deneysel araştırılması, *Doktora Tezi*, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- [7] **Budak, N., Bayındır, H., ve Yücel, H.L.**, 2009. Dizel motorlarda biyodizel kullanımının performans ve egzoz emisyonları açısından değerlendirilmesi, *V. Yenilenebilir enerji kaynakları sempozyumu* Diyarbakır 123-130.
- [8] **Hazar, H.**, 2010. Cotton methyl ester usage in a diesel engine equipped with insulated combustion chamber, *Appl. Energy*, **87**, 134-140.
- [9] **Arpa, O., Yumrutaş, R. ve Kaşka, Ö.**, 2008. Atık motor yağından elde edilen dizel benzeri yakıtın motor performans ve eksoz emisyonu üzerindeki etkisinin incelenmesi, *VII. Ulusal Temiz enerji Sempozyumu*, 17-19 Aralık, İstanbul, 293-304.
- [10] **Demirbaş, A. and Karşlıoğlu, S.**, 2007. Biodiesel production facilities from vegetable oils and animal fats, *Energy Sources, Part: A*, **29**, 133–141.
- [11] **Meher, L.C., Sagar, D.V. and Naik, S.N.**, 2006. Technical aspects of biodiesel production by transesterification: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **10**, 248–268.
- [12] **Ramadhass, A.S., Jayaraj, S. and Muraleedharan, C.**, 2004. Use of vegetable oils as CI engine fuels: A review, *Renewable Energy*, **29**, 727–742.
- [13] **Çanakçı, M.**, 2007. Combustion characteristics of a turbocharged DI compression ignition engine fueled with petroleum diesel fuels and biodiesel, *Bioresource Technology*, **98**, 1167–1175.
- [14] **Lin, C.H., Lin, H.A. and Hung, L.B.**, 2006. Fuel structure and properties of biodiesel produced by the peroxidation process, *Fuel*, **85**, 1743-1749.
- [15] **Kegl, B.**, 2008. Biodiesel usage at low temperature, *Fuel*, **87**, 1306-1317.

- [16] **Acaroğlu, M.**, 2003. Alternatif Enerji Kaynakları, Atlas Yayın Dağıtım, İstanbul, 75–78, 229–256.
- [17] **Keskin, A.**, 2005. Tall yağı esaslı biyodizel ve yakıt katkı maddesi üretimi ve bunların dizel motor performansı üzerindeki etkileri, *Doktora Tezi*, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- [18] **Campenon, T., Wouters, P., Blanchard, G., Macaudiere, P. and Seguelong T.**, 2004. Improvement and simplification of DPF system using a ceria-based fuel-borne catalyst for diesel particulate filter regeneration in serial applications, *SAE Technical Paper*, 2004-01-0071.
- [19] **Gürü, M., Karakaya, U., Altıparmak, D. and Alıcılar, A.**, 2002. Improvment of diesel fuel properties by using additives, *Energy Conversion & Management*, **43**, 1021-1025.
- [20] **Kanan, G.R., Karvembu, R. and Anand, R.**, 2011. Effect of metal based additive on performance emission and combustion characteristics of diesel engine fuelled with biodiesel, *Applied Energy*, **88**, 3694–3703.
- [21] **Kelso, DT., Epperly, WR. and Hart, ML.**, 1990. Effects of platinum fuel additive on the emissions and efficiency of diesel engines, *SAE Technical Paper*, 1990-90-1492.
- [22] **May, WR., Hirs, E.A.**, 2005. Catalyst for improving the combustion efficiency of petroleum fuels in diesel engines, *11th diesel engine emissions reduction conference*, August 21–25, Chicago IL, 1-16.
- [23] **Okuda, T., Schauer, J.J., Olson, M.R., Shafer M.M., Rutter, A.P., Walz K.A. and Morschauser P.A.**, 2009. Effects of a platinum-cerium bimetallic fuel additive on the chemical composition of diesel engine exhaust particles, *Energy Fuels*, **23**, 4974–4980.
- [24] **Keskin, A., Gürü, M. and Altıparmak, D.**, 2007. Biodiesel production from tall oil synthesized Mn and Ni based additives: effects of the additives on fuel consumption and emissions, *Fuel*, **86**, 1139–1143.
- [25] **Gürü, M., Koca, A., Can, Ö., Çınar, C. and Şahin, F.**, 2010. Biodiesel production from waste chicken fat based sources and evaluation with Mg based additive in a diesel engine, *Renewable Energy*, **35**, 637–643.
- [26] **Çaynak, S., Gürü, M., Biçer, A., Keskin, A. and İçingür, Y.**, 2009. Biodiesel production from pomace oil and improvement of its properties with synthetic manganese additive, *Fuel*, **88**, 534–538.
- [27] **Kanan, G.R., Karvembu, R. and Anand, R.**, 2011. Effect of metal based additive on performance emission and combustion characteristics of diesel engine fuelled with biodiesel, *Applied Energy*, **88**, 3694–3703.
- [28] **Kalam, M.A. and Majuski, H.H.**, 2008. Testing palm biodiesel and NPAA additives to control NO<sub>x</sub> and CO while improving efficiency in diesel engines, *Biomass Bioenergy*, **32**, 1116–1122.
- [29] **Borat, O., Balcı, M. ve Sürmen, A.**, 1995. İçten Yanmalı Motorlar, Teknik Eğitim Vakfı Yayınları, Ankara, 253s.
- [30] <http://www.eie.gov.tr/yenilenebilir/biyodizel.aspx>, 12 Eylül 2012.
- [31] <http://www.ebb-eu.org/stats.php>, European Biodiesel Board, 18 Eylül 2012.
- [32] **Karaosmanoğlu, F.**, 2002. Türkiye için çevre dostu - yenilenebilir bir yakıt adayı: biyomotorin, *Kojenerasyon Dergisi*, **10**, 50-56.
- [33] **Karaosmanoğlu, F.**, 2007. Biyomotorin ve Türkiye, [www.biyomotorin-biyodizel.com/biomoto.html](http://www.biyomotorin-biyodizel.com/biomoto.html).
- [34] [www.cevreorman.gov.tr/belgeler/yaglar.pdf](http://www.cevreorman.gov.tr/belgeler/yaglar.pdf) 19 Aralık 2011

- [35] **Srivastava, A. and Prasad, R.**, 2000. Triglycerides-based diesel fuels, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **4**, 111-133.
- [36] **Demirbaş, A. and Karşoğlu, S.**, 2007. Biodiesel production facilities from vegetable oils and animal fats, *Energy Sources, Part: A*, **29**, 133-141.
- [37] **Marchetti, J.M., Miguel, V.U. and Errazu, A.F.**, 2007. Possible methods for biodiesel production, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **11**, 1300-1311.
- [38] **Ma, F. and Hanna, M.A.**, 1999. Biodiesel production: A review, *Bioresource Technology*, **70**, 1-15.
- [39] **Agarwal, A.K.**, 2007. Biofuels (alcohols and biodiesel) applications as fuels for internal combustion engines, *Progress in Energy and Combustion Science*, **33**, 233-271.
- [40] **Freedman, B., Butterfield, R.O. and Pryde, E.H.**, 1986. Transesterification kinetics of soybean oil, *JAOCS*, **63**, 1375-1380.
- [41] **Çıldır, O. ve Çanakçı, M.**, 2006. Çeşitli bitkisel yağlardan biyodizel üretiminde katalizör ve alkol miktarının yakıt özellikleri üzerine etkisinin incelenmesi, *Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der.*, **21**, 367-372.
- [42] **Demirbaş, A.**, 2002. Biodiesel from vegetable oils via transesterification in supercritical methanol, *Energy Conversion and Management*, **43**, 2349-2356.
- [43] **Felizardo, P., Correia, M.J.N., Raposo, I., Mendes, J.F., Berkemeier, R. And Bordado, J.M.**, 2006. Production of biodiesel from waste frying oils, *Waste Management*, **26**, 487-494.
- [44] **Çanakçı, M. And Van Gerpen, J.**, 1999. Biodiesel production via acid catalysis, *Transactions of the ASAE*, **42**, 1203-1210.
- [45] **Tillem, İ.**, 2005. Dizel motorları için alternatif yakıt olarak biyodizel üretimi ve kullanımı, Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, *Yüksek Lisans Tezi*, Denizli.
- [46] **Ecevit, F.M. and Kelen, M.**, 1999. Isparta (Atabey)'de yetiştirilen üzüm çeşitlerinin ampelografik özelliklerinin belirlenmesi üzerine bir araştırma, *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, **23**, 511-518.
- [47] **Ünver, H., ve Sakar, E.**, 2011. Türkiye'de ceviz yetiştiriciliğinin durumu ve yapılan seleksiyon çalışmaları, *Harran Üniv. Ziraat Fak. Der.*, **15**, 61-69.
- [48] **Güner, M., Vatandaş, M. ve Dursun, E.**, 1999. Bazı kayısı çeşitlerinde çekirdek kırılma karakteristiklerinin belirlenmesi, *Ankara Üniv. Ziraat Fak. Der.*, **5**, 95-103.
- [49] **Alptekin, E. and Çanakçı, M.**, 2010. Optimization of pretreatment reaction for methyl ester production from chicken fat, *Fuel*, **89**, 4035-4039.
- [50] <http://www.bukas.com.tr/Product.asp?C=1&P=14>, 25 Mayıs 2012.
- [51] **Reyes, J.F. and Sepulveda, M.A.**, 2006. PM-10 emissions and power of a diesel engine fueled with crude and refined biodiesel from salmon oil, *Fuel*, **85**, 1714-1719.
- [52] **Naik, M., Meher, L.C., Naik, S.N. and Das, L.M.**, 2008. production of biodiesel from high free fatty acid karanja (pongamia pinnata) oil, *Biomass and Bioenergy*, **32**, 354-357.
- [53] **Sharma, Y.C. and Singh, B.**, 2008. Development of biodiesel from karanja, a tree found in rural India, *Fuel*, **87**, 1740-1742.
- [54] **Graboski, M.S. and McCormick, R.L.**, 1998. Combustion of fat and vegetable oil derived fuels in diesel engines, *Prog. Energy Combust. Sci.*, **24**, 125-164.
- [55] **Fukuda, H., Kondo A. and Noda H.**, 2001. Review biodiesel fuel production by transesterification of oils, *Journal of Biosci. and Bioeng.*, **92**, 405-416.

- [56] **Sims, Ralph E.H.**, 1985, Tallow esters as an alternative diesel fuel, transactions of ASAE, **28**, 716-721.
- [57] <http://www.tobb.org.tr>, 17 Haziran 2012.
- [58] **Temizer, İ.**, 2010. Bir dizel motorunun performans ve emisyonları üzerine katkı maddelerinin etkisinin incelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- [59] **Ali, Y., and Hanna, M.A.**, 1994, Physical Properties of Tallow Ester and Diesel Fuel Blends, *Bioresource Technology*, **47**, 131-134.
- [60] **Pugazhavadivu, M. and Jeyachandran, K.**, 2005, Investigations on the Performance and Exhaust Emissions of a Diesel Engine Using Preheated Waste Frying Oil as Fuel, *Renewable Energy*, **30**, 2189–2202.
- [61] **Raheman, H., and Phadatare, A.G.**, 2004, Diesel Engine Emissions and Performance from Blends of Karanja Methyl Ester and Diesel, *Biomass and Bioenergy*, **27**, 393 – 397.
- [62] **Gomez, M.E.G., Howard-Hildige, R., Leahy, J.J., O'Reilly, T., Supple, B. and Malone, M.**, 2000. Emission and performance characteristics of a 2 liter Toyota Diesel van operating on esterified waste cooking oil and mineral diesel fuel, *Environmental Monitoring and Assessment*, **65**, 13-20.
- [63] **Dorado, MP., Ballesteros, E., Arnal, JM., Gomez, J., Lopez, FJ.**, 2003. Exhaust emissions from a diesel engine fuelled with transesterified waste olive oil, *Fuel*, **82**, 1311-1315.
- [64] **Usta N.**, 2005. An experimental study on performance and exhaust emissions of a diesel engine fuelled with tobacco seed oil methyl ester, *Energy Conversion and Management*, **46**, 2373-2386.
- [65] **Altın, R., Cetinkaya, S. and Yücesu, H.S.**, 2001. The potential of using vegetable oil fuels as fuel for Diesel engines, *Energy Conversion and Management*, **42**, 529-538.
- [66] **Fernando, S., Hall, C. and Jha, S.**, 2006. NOx reduction from biodiesel fuels, *Energy & Fuels*, **20**, 376-382.
- [67] **Tat, ME.**, 2003. Investigation of oxides of nitrogen emissions from biodiesel-fueled engines, *Ph.D. dissertation*, Iowa State University, ABD.
- [68] **Lloyd, A.C. and Cackette, T.A.**, 2001, Diesel Engines: Environmental Impact and Control, ISSN 1047-3289 J. Air & Waste Manage. Assoc. **51**, 809-847.
- [69] **Lapuerta, M., Armas, O., and Rodriguez-Fernandez, J.**, 2008. effect of biodiesel fuels on engine emissions, *Progress in Energy and Combustion Science*, **34**, 198-223.
- [70] **Altıparmak D., Keskin A., Koca A. And Gürü M.**, 2007. Alternative fuel properties of tall oil fatty acid methyl ester-diesel fuel blends, *Bioresource Technology*, **98**, 241-246.
- [71] **Abdel-Rahman A.A.**, 1998. On the emissions from internal-combustion engines: A review, *International Journal of Energy Research*, **22**, 483-513.
- [72] **Lin, C.H. and Lin, H.A.**, 2006. Diesel engine performance and emissions characteristics of biodiesel produced by the peroxidation process, *Fuel*, **85**, 298-305
- [73] **Özsezen, A.N.**, 2007. Atık palmiye yağından üretilen biyodizelin motor performans ve emisyon karakterleri üzerine etkisinin incelenmesi, *Doktora Tezi*, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli.
- [74] **Nişancı, S.**, 2007. Biyodizel yakıt karışımlarının performans ve emisyon üzerine etkilerinin deneysel araştırılması, *Yüksek Lisans Tezi*, YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul

- [75] **Nabi, N., Akhter, S., and Shahadat, M.Z.**, 2006. Improvement of engine emissions with conventional diesel fuel and diesel–biodiesel blends, *Bioresource Technology*, **97**, 372–378.
- [76] **Kumar, M.S., Kerihuel, A., Belletre, J. and Tazerout, M.**, 2005. Experimental investigation on the use of preheated animal fat as fuel in a compression ignition engine, *Renewable Energy*, **30**, 1443-1456.
- [77] **Lapuerta, M., Rodriguez-Fernandez, J. and Agudelo, J.R.**, 2008. Diesel particulate emissions from used cooking oil biodiesel, *Bioresource Technology*, **99**, 731–740.
- [78] **Puhana, S., Vedaramana, N., Rama, B.V.B., Sankarnarayananb, G. and Jeychandran, K.**, 2005. Mahua oil (madhuca indica seed oil) methyl ester as biodiesel-preparation and emission characteristics, *Biomass and Bioenergy*, **28**, 87–93.
- [79] **Demirtaş, A.**,2007, Importance of Biodiesel as Transportation Fuel, *Energy Policy* **35**, 4661-4670
- [80] **Clark, S.J., Wagler, L., Schrock, M.D., Piennaar, P.G.**, 1984, Methyl and Ethyl Soybean Esters as Renewable Fuels for Diesel Engines, *JAOCS* **61**, 1632-1641
- [81] <http://www.istanbul.edu.tr/eng/metalurji/sem.htm> ,1 Ocak 2013

## **ÖZGEÇMİŞ**

1979 yılında Elazığ’da doğdu. İlk, orta ve lise eğitimini Elazığ’ın Keban ilçesinde tamamladı. 2002 yılında Fırat Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Makine Eğitimi Otomotiv Öğretmenliği bölümünü bitirdi. 2003–2008 yılları arasında hidroelektrik santrallerinin tamir bakım ekibinde uzman olarak çalıştı. 2010 yılında Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Eğitimi A.B.D’ da yüksek lisansa başladı. 2011 yılında Siirt Üniversitesi Meslek Yüksekokulu Makine Programına öğretim görevlisi olarak atandı.