



**ATIK LASTİKTEN ELDE EDİLEN PİROLİTİK  
YAKITIN MOTOR PERFORMANS VE  
EMİSYONLARINA ETKİSİ**

**Sercan UZUN**

**2020  
YÜKSEK LİSANS TEZİ  
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ**

**Tez Danışmanı  
Dr. Öğr. Üyesi Mustafa KARAGÖZ**

**DİZEL BİR MOTORDA ATIK LASTİKTEN ELDE EDİLEN PİROLİTİK  
YAKITIN MOTOR PERFORMANS VE EMİSYONLARINA ETKİSİ**

**Sercan UZUN**

**Karabük Üniversitesi  
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü  
Makine Mühendisliği Anabilim Dalında  
Yüksek Lisans Tezi  
Olarak Hazırlanmıştır**

**KARABÜK  
Nisan 2020**

Sercan UZUN tarafından hazırlanan “DİZEL BİR MOTORDA ATIK LASTİKTEN ELDE EDİLEN PİROLİTİK YAKITIN MOTOR PERFORMANS VE EMİSYONLARINA ETKİSİ” başlıklı bu tezin Yüksek Lisans Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Dr. Öğr. Üyesi Mustafa KARAGÖZ  
Tez Danışmanı, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

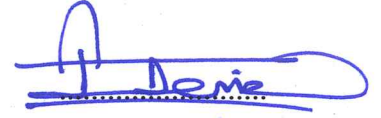


Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile Makine Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir. 20/04/2020

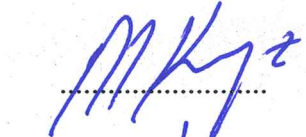
Ünvanı, Adı SOYADI (Kurumu)

İmzası

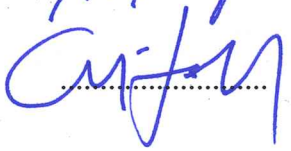
Başkan : Prof Dr. Emrah DENİZ (KBÜ)



Üye : Dr. Öğr. Üyesi Mustafa KARAGÖZ (KBÜ)



Üye : Dr. Öğr. Üyesi Mustafa AYDIN (PAÜ)



...../...../2020

KBÜ Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulu, bu tez ile, Yüksek Lisans derecesini onamıştır.

Prof. Dr. Hasan SOLMAZ  
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

.....

*“Bu tezdeki tüm bilgilerin akademik kurallara ve etik ilkelere uygun olarak elde edildiğini ve sunulduğunu; ayrıca bu kuralların ve ilkelerin gerektirdiği şekilde, bu çalışmadan kaynaklanmayan bütün atıfları yaptığımı beyan ederim.”*

Sercan UZUN

## ÖZET

### Yüksek Lisans Tezi

## DİZEL BİR MOTORDA ATIK LASTİKTEN ELDE EDİLEN PİROLİTİK YAKITIN MOTOR PERFORMANS VE EMİSYONLARINA ETKİSİ

Sercan UZUN

Karabük Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı:

Dr. Öğr. Üyesi Mustafa KARAGÖZ

Nisan 2020 , 65 sayfa

Bu çalışmada, atık taşıt lastiğinden elde edilen lastik piroliz yağı (LPY), dizel bir motorda kullanılması ve yakıt özelliklerinin iyileştirilmesi için asit ile yıkama işlemi, kil ve kalsiyum oksit işlemi, distilasyon işlemi ve oksidatif sülfür giderim işlemlerini içeren saflaştırma işlemlerine tabi tutulmuştur. Saflaştırılan ve yakıt özellikleri iyileştirilen LPY, saf dizel ile farklı oranlarda (hacimce %0, %15, %30 ve %45) harmanlanmıştır. Elde edilen yakıtlar, tek silindirli, hava soğutmalı dizel bir motor-jeneratör setinde kullanılarak testler gerçekleştirilmiştir. Testler sabit motor hızında (2000 rpm), dört farklı motor yükünde (500, 750, 1000 ve 1250 W) yapılmıştır. Daha sonra, saf dizele LPY ilavesinin etkisini gözlemlemek için motor performansı, yanma karakteristikleri ve egzoz emisyonları deneysel olarak incelenmiştir. Deneylelerden elde edilen sonuçlarda, Fren özgül yakıt tüketimi (BSFC) hem düşük motor yüklerinde hem de karışımlarda LPY içeriğinin artmasıyla artmış, Fren termal verim (BTE) ise tersine düşmüştür. Öte yandan, ısı salınım oranı ve silindir içi basınç hem motor yüklerindeki artışlara hem de karışımlardaki LPY içeriğine bağlı olarak önemli ölçüde artmıştır. Ek

olarak, üretilen LPY'nin karbon ve oksijen içeriği kısmen dizel yakıtına yakındır, ancak hidrojen içeriği dizel yakıtta daha yüksektir. Bu yüzden hem CO hem de NO<sub>x</sub> emisyonlarında dikkate değeri herhangi bir değışiklik gözlemlenmemiştir. Bununla birlikte, HC emisyonu, karışımlardaki LPY içeriğinin artmasıyla önemli ölçüde azalmıştır.

**Anahtar Sözcükler:** Atık taşıt lastiği, piroliz yağı, yanma, performans, emisyon.

**Bilim Kodu** : 91440

## **ABSTRACT**

**M. Sc. Thesis**

### **WASTE TIRE IN A DIESEL ENGINE EFFECT OF FUEL ON ENGINE PERFORMANCE AND EMISSIONS**

**Sercan UZUN**

**Karabük University  
Institute of Graduate Programs  
Department of Mechanical Engineering**

**Thesis Advisor:**

**Dr. Mustafa KARAGÖZ**

**April 2020, 65 pages**

In this study, the tire pyrolysis oil (LPY) obtained from the waste vehicle tire was subjected to purification processes including acid washing, clay and calcium oxide treatment, distillation treatment and oxidative sulfur removal processes for use in a diesel engine and improving fuel properties. It was applied. Purified and improved fuel properties, LPY was blended with pure diesel in different proportions (0%, 15%, 30% and 45% by volume). Tests were carried out using the fuels obtained in a single cylinder, air cooled diesel engine generator set. The tests were carried out at constant engine speed (2000 rpm) at four different engine loads (500, 750, 1000 and 1250 W). Later, engine performance, combustion characteristics and exhaust emissions were investigated experimentally to observe the effect of adding LPY to the pure diesel. In the results obtained from the experiments, BSFC increased with the increase of LPY content both in low engine loads and mixtures, while BTE decreased in reverse. On the other hand, heat release rate and in-cylinder pressure have increased significantly

due to both increases in engine loads and LPY content in mixtures. In addition, the carbon and oxygen content of the LPY produced is partially close to diesel fuel, but the hydrogen content is higher in diesel fuel. Therefore, any notable changes were observed in both CO and NO<sub>x</sub> emissions. However, HC emission has decreased significantly with increasing LPY content in mixtures.

**Keywords:** Waste vehicle tire, pyrolysis oil, combustion, performance, emission.

**Science Code :** 91440



## TEŞEKKÜR

Bu tez alıőmasının planlanmasında, araőtırılmasında, yürütülmesinde ve oluşumunda ilgi ve desteğini esirgemeyen, engin bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım, yönlendirme ve bilgilendirmeleriyle çalıőmamı bilimsel temeller ışığında őekillendiren sayın hocam Dr. Öğr. Üyesi Mustafa KARAGÖZ'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Sevgili aileme manevi hiçbir yardımını esirgmeden yanımda oldukları için tüm kalbimle teşekkür ederim.

Bu alıőma Karabük Üniversitesi Bilimsel Araőtırma Projeleri Birimi tarafından finanse edilmiştir. (Proje numarası KBÜBAP-18-YL-190).

## İÇİNDEKİLER

|   | <u>Sayfa</u> |
|---|--------------|
| KABUL.....  | ii           |
| ÖZET.....   | iv           |
| ABSTRACT.....   | vi           |
| TEŞEKKÜR.....   | viii         |
| İÇİNDEKİLER .....   | ix           |
| SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ .....  | xiv          |
| <br>  |              |
| BÖLÜM 1 .....   | 1            |
| GİRİŞ .....   | 1            |
| <br>  |              |
| BÖLÜM 2 .....   | 3            |
| ATIK TAŞIT LASTİKLERİ VE PİROLİZİ.....  | 3            |
| 2.1. ATIK TAŞIT LASTİKLERİNİN GENEL ÖZELLİKLERİ .....                               | 3            |
| 2.2. ATIK TAŞIT LASTİKLERİNİN PİROLİZİ .....  | 4            |
| <br>  |              |
| BÖLÜM 3 .....   | 6            |
| 3.1. DİZEL MOTORLARDA YAKIT ÖZELLİKLERİNİN EMİSYON VE<br>PERFORMANSA ETKİLERİ ..... | 6            |
| 3.1.1. Setan Sayısı.....  | 6            |
| 3.1.2. Yakıtın Kükürt İçeriği.....  | 7            |
| 3.1.3. Distilasyon Özelliği ve Aromatik İçeriği.....                                | 8            |
| 3.1.4. Yakıtın Yoğunluğu .....  | 8            |
| 3.1.5. Yakıtın Viskozitesi .....  | 9            |
| 3.1.6. Yakıtın Enerji İçeriği.....  | 10           |
| 3.1.7. Yakıtın Kül İçeriği.....   | 10           |
| 3.1.8. Atık Karbon İçeriği.....   | 10           |
| 3.1.9. Parlama Noktası.....   | 10           |
| 3.1.10. Soğuk Akış Özellikleri .....  | 11           |

|  | <b><u>Sayfa</u></b> |
|--|---------------------|
| 3.1.11. Yağlayıcılık Özelliği ve Oksidasyon Kararlılığı .....              | 11                  |
| 3.2. DİZEL MOTORLARDA KARIŞIM TEŞKİLİ VE YANMA.....                        | 11                  |
| 3.3. DİZEL MOTORLARDA EMİSYONLARIN OLUŞUMU .....                           | 12                  |
| 3.3.1. Partikül Madde ve İS Emisyonları .....                              | 13                  |
| 3.3.2. Nitrojen Oksit (NO <sub>x</sub> ) Emisyonları .....                 | 13                  |
| 3.3.3. Hidrokarbon (HC) Emisyonları .....                                  | 14                  |
| 3.3.4. Karbon monoksit (CO) Emisyonları .....                              | 14                  |
| <b>BÖLÜM 4 .....</b>   | <b>16</b>           |
| <b>LİTERATÜR ARAŞTIRMASI .....</b>   | <b>16</b>           |
| 4.1. ATIKLARDAN ELDE EDİLEN YAKITLARIN DİZEL MOTORLARDA<br>KULLANIMI.....  | 16                  |
| 4.2. ATIK KÖKENLİ YAKITLARIN YAKIT ÖZELLİKLERİNİN<br>İYİLEŞTİRİLMESİ ..... | 20                  |
| <b>BÖLÜM 5 .....</b>   | <b>25</b>           |
| <b>DENEYSEL ÇALIŞMALAR .....</b>   | <b>25</b>           |
| 5.1. DENEY YAKITININ HAZIRLANMASI .....                                    | 25                  |
| 5.2. MOTOR TESTİ DENEY DONANIMI .....                                      | 27                  |
| 5.2.1. Egzoz Gazı Analizörü.....   | 29                  |
| 5.2.2. Osiloskop .....   | 30                  |
| 5.2.3. Deney Motoru .....  | 30                  |
| 5.2.4. Yükleme Seti .....  | 32                  |
| 5.2.5. Yakıt Tüketiminin Belirlenmesi .....                                | 32                  |
| 5.2.6. Data Logger .....   | 33                  |
| 5.2.7. Güç Kaynağı .....   | 34                  |
| 5.2.8. Isıl Çift.....  | 35                  |
| 5.2.9. Krank Açısının ve Silindir İçi Basıncın Ölçülmesi .....             | 35                  |
| 5.3. DENEY VERİLERİ İLE HESAPLANAN PERFORMANS DEĞERLERİ .                  | 37                  |
| 5.3.1. Motor Hacminin Anlık Değişimi.....                                  | 37                  |
| 5.3.2. Silindir Basıncının Analizi .....                                   | 37                  |
| 5.3.3. Isı Açığa Çıkış Oranının Hesaplanması.....                          | 38                  |

|   | <b><u>Sayfa</u></b> |
|---|---------------------|
| 5.3.4. Isı Açıĝa Çıkış Oranının Filtrenmesi .....         | 39                  |
| 5.3.5. Efektif Verim .....                                | 40                  |
| 5.3.6. Özgöl Yakıt Tüketimi .....                         | 40                  |
| <b>BÖLÜM 6</b> .....                                      | <b>41</b>           |
| <b>DENEYSEL BULGULAR</b> .....                            | <b>41</b>           |
| 6.1. Motor Testleri.....                                  | 41                  |
| 6.2. Performans Karakteristikleri .....                   | 41                  |
| 6.3. Emisyon karakteristikleri .....                      | 42                  |
| 6.3.1. NO <sub>x</sub> Emisyonu ve Egzoz Sıcaklığı.....   | 42                  |
| 6.3.2. HC Emisyonu .....                                  | 44                  |
| 6.3.3. CO Emisyonu .....                                  | 45                  |
| 6.4. Yanma Karakteristikleri .....                        | 45                  |
| <b>BÖLÜM 7</b> .....                                      | <b>52</b>           |
| <b>SONUÇLAR VE ÖNERİLER</b> .....                         | <b>52</b>           |
| <b>KAYNAKLAR</b> .....                                    | <b>54</b>           |
| <b>EK AÇIKLAMALAR A</b> .....                             | <b>61</b>           |
| <b>EGZOS EMİSYON CİHAZI KALİBRASYON SERTİFİKASI</b> ..... | <b>61</b>           |
| <b>ÖZGEÇMİŞ</b> .....                                     | <b>65</b>           |

## ŞEKİLLER DİZİNİ

|   | <b><u>Sayfa</u></b> |
|---|---------------------|
| Şekil 5.1. Yakıt özelliklerinin iyileştirilme basamakları.....  | 25                  |
| Şekil 5.2. Isıtıcı, karıştırıcı ünite. ....   | 26                  |
| Şekil 5.3. Deney sisteminin şeması.....   | 28                  |
| Şekil 5.4. Deney sisteminin görünümü. ....  | 28                  |
| Şekil 5.5. Egzoz gaz analizörü. ....  | 29                  |
| Şekil 5.6. Osiloskop.....   | 30                  |
| Şekil 5.7. Dizel motor jeneratör seti.....  | 31                  |
| Şekil 5.8. Yükleme seti.....  | 32                  |
| Şekil 5.9. Yakıt tüketiminin ölçülmesi.....   | 33                  |
| Şekil 5.10. Data logger.....  | 34                  |
| Şekil 5.11. Güç kaynağı. ....   | 34                  |
| Şekil 5.12. Isıl çift. ....   | 35                  |
| Şekil 5.13. Basınç ve krank açısı sensörlerine ait fotoğraflar. ....  | 36                  |
| Şekil 6.1. Test yakıtı ve yüke bağlı olarak BSFC' nin değişimi.....   | 42                  |
| Şekil 6.2. Test yakıtı ve yüke bağlı olarak BTE' nin değişimi. ....   | 42                  |
| Şekil 6.3. Test yakıtı ve yüke bağlı olarak NOx emisyonunun değişimi.....   | 43                  |
| Şekil 6.4. Test yakıtı ve yüke bağlı olarak egzoz gaz sıcaklığının değişimi.....  | 44                  |
| Şekil 6.5. Test yakıtı ve yüke bağlı olarak HC emisyonunun değişimi. ....   | 44                  |
| Şekil 6.6. Test yakıtı ve yüke bağlı olarak CO emisyonunun değişimi. ....   | 45                  |
| Şekil 6.7. Test yakıtı ve yüke bağlı olarak silindir içi basınç değişimi (A 500 W, B 750 W, C 1000 W, D 1250 W motor yükü için).....  | 48                  |
| Şekil 6.8. Test yakıtı ve yüke bağlı olarak maksimum silindir basınç değişimi. ....   | 49                  |
| Şekil 6.9. Test yakıtı ve yüke bağlı olarak ısı salınım oranları değişimi (A 500 W, B 750 W, C 1000 W, D 1250 W motor yükü için)..... | 51                  |

## ÇİZELGELER DİZİNİ

|  | <b><u>Sayfa</u></b> |
|--|---------------------|
| Çizelge 2.1. Binek ve ağır taşıt lastiğinin yapısında bulunan bileşenler.....                          | 3                   |
| Çizelge 5.1. Yakıt özellikleri.....  | 27                  |
| Çizelge 5.2. Egzoz emisyon cihazı ölçüm aralıkları ve ölçüm hassasiyetleri.....                        | 29                  |
| Çizelge 5.3. Dizel motor-jeneratör seti teknik özellikleri.....  | 31                  |
| Çizelge 5.4. Data logger teknik özellikleri.....   | 33                  |
| Çizelge 5.5. Krank açısı ve silindir içi basınç ölçümünde kullanılan sensörlerin ölçüm aralıkları..... | 36                  |

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

### SİMGELER

|              |   |
|--------------|---|
| $A$          | : Krank yarıçapı (cm)                     |
| $B_{kol}$    | : Kuvvet kolu uzunluğu (cm)               |
| $B_e$        | : Yakıt tüketimi                          |
| $CaO$        | : Kalsiyum oksit                          |
| $Ca(OH)_2$   | : Kalsiyum hidroksit                      |
| $CH_4$       | : Metan                                   |
| $CO$         | : Karbon monoksit                         |
| $CO_2$       | : Karbondioksit                           |
| $C_2H_2$     | : Asetilen                                |
| $C_2H_6$     | : Etan                                    |
| $dP/d\theta$ | : Basınç değişimi                         |
| $du$         | : İç enerji değişimi                      |
| $D$          | : Piston çapı (cm)                        |
| $F$          | : Yük hücreğine uygulanan kuvvet (N)      |
| $g$          | : Yerçekim ivmesi ( $m/s^2$ )             |
| $HC$         | : Hidrokarbon                             |
| $H_2S$       | : Hidrojen sülfür                         |
| $H_2SO_4$    | : Sülfürik asit                           |
| $M_e$        | : Motor torku (Nm)                        |
| $M_y$        | : $t_y$ süresinde tüketilen yakıt miktarı |
| $n$          | : Motor devri (rpm)                       |
| $NO$         | : Nitrojen monoksit                       |
| $NO_2$       | : Nitrojen dioksit                        |
| $NO_x$       | : Nitrojen oksit                          |
| $P$          | : Silindir basıncı (MPa)                  |
| $P_e$        | : Motor gücü (kW)                         |
| $P_{cyl}$    | : Çevrim basıncı (MPa)                    |
| $P_{maks}$   | : Maksimum silindir basıncı               |

|                    |   |
|--------------------|---|
| $P_{ref}$          | : Emme supabının kapandığı noktadaki çevrim basıncı                   |
| $Q_n$              | : Isı salınım oranı (ISO)   |
| $R$                | : İdeal gaz sabiti  |
| $r$                | : Biyel kolu uzunluğu (cm)  |
| $S$                | : Kurs boyu (cm)  |
| $SO$               | : Sıkıştırma oranı  |
| $SO_2$             | : Kükürt dioksit  |
| $SO_x$             | : Kükürt oksit  |
| $T_{Egzoz}$        | : Egzoz gaz sıcaklığı (°C)  |
| $T_{maks.ort.gaz}$ | : Maksimum silindir içi ortalama gaz sıcaklığı (°C)                   |
| $T_{ort.gaz}$      | : Silindir içi ortalama gaz sıcaklığı (°C)                            |
| $T_{ref}$          | : Emme supabının kapandığı noktadaki referans sıcaklık (°C)           |
| $t_y$              | : Süre (saniye)   |
| $V$                | : Toplam :motor hacmi (m <sup>3</sup> )                               |
| $V_c$              | : Yanma :odası hacmi (m <sup>3</sup> )                                |
| $V_{cyl}$          | : Anlık silindir hacmi (m <sup>3</sup> )                              |
| $V_{ref}$          | : Emme supabının kapandığı noktadaki silindir hacmi (m <sup>3</sup> ) |
| $W$                | : Sistem sınırı tarafından yapılan iş (J)                             |
| $\omega$           | : Açısal hız (açı/saniye)   |
| $\rho_y$           | : Yakıt yoğunluğu   |
| $\theta$           | : Krank mili açısı  |
| $\eta_e$           | : Efektif verim   |



## **KISALTMALAR**

|      |                               |
|------|-------------------------------|
| LHV  | : Alt Isıl Değer              |
| AÖN  | : Alt Ölü Nokta               |
| CST  | : Sentistrok                  |
| C/H  | : Karbon/Hidrojen Oranı       |
| EGR  | : Egzoz Gaz Resirkülasyonu    |
| EN   | : Avrupa Normu                |
| BSFC | : Fren Özgöl Yakıt Tüketimi   |
| BTE  | :Fren Termal Verim            |
| gy   | : Gram                        |
| GJ   | : Giga-Joule                  |
| HLPY | : Ham Lastik Pirolitik Yakıtı |
| Hz   | : Herz                        |
| ISO  | : Isı Salınım Oranı           |
| kHz  | : Kiloherz                    |
| KMA  | : Püskürtme Açısı             |
| kPa  | : Kilopascal                  |
| kW   | : Kilowatt                    |
| L    | : Litre                       |
| LPY  | : Lastik Pirolitik Yakıtı     |
| M    | : Metre                       |
| ml   | : Mililitre                   |
| M/M  | : Kütlesel Yüzde              |
| Nm   | : Nano Metre                  |
| Nm   | : Newton Metre                |
| MJ   | : Mega-Joule                  |
| PPM  | : Milyonda Bir Parça          |
| S    | : Saniye                      |
| SI   | : Setan İndisi                |
| V/V  | : Hacimsel Yüzde              |
| Mm   | : Mikronmetre                 |

|        |                       |
|--------|-----------------------|
| HC     | : Hidrokarbon         |
| NO     | : Azot Oksit          |
| CO     | : Karbonmonoksit      |
| Mo     | : Molibden            |
| kVA    | : Kilo Volt Amper     |
| $V_y$  | : Yanma Odası Hacmi   |
| $A_p$  | : Piston Tepesi Alanı |
| $\eta$ | : Efektif Verim       |

## BÖLÜM 1

### GİRİŞ

Dünya’da nüfusundaki hızlı artış, yaşam standartlarının artması insanoğlunun enerji açlığını gündün güne artırmaktadır. En önemli enerji kaynaklarından birisi olan fosil kaynaklı yakıtlar insanoğlunun yaşamında çok önemli bir yere sahiptir. Enerjiye talebin artması ve fosil kaynaklı yakıt rezervlerinin azalması, fosil kaynaklı yakıt fiyatlarının artmasına neden olmuştur. Bu sorun bilim adamlarını tarih boyunca fosil kaynaklı yakıtlara bağımlılığı azaltmaya ya da alternatif yakıtlar aramaya sevk etmiştir. Bu somut adımlar genel olarak biyodizel veya biyo alkoller gibi yenilenebilir enerji kaynakları olan biyoyakıtların kullanılması üzerinedir. Öte yandan, bazı çalışmalar atık malzemelerin geri dönüşümüyle atıktan enerji elde etmeye odaklanmıştır. Ancak bu çalışmaların sayısı oldukça azdır. Aslında, atıktan enerjiye en yararlı yolun piroliz olduğu kabul edilmektedir. Çünkü hem çevresel hem de ekonomik sorunlara aynı anda çözüm sunmaktadır. Atıktan-enerji kavramı kapsamında, yüksek verimli biyo-y yağların kullanımı, tarımsal atıkların, hayvansal atıkların, odun stoklarının yakma, anaerobik fermentasyon, gazlaştırma ya da piroliz gibi yöntemlerle atıktan enerjiye dönüştürülmesi mümkündür.

Atıkların çevreye olan etkileri görmezden gelinemeyecek kadar fazladır. On yıllarca, yüz yıllarca atıkların toprakta kendiliğinden çözünmemesi görsel kirliliğin yanı sıra yer altı sularının ve deniz sularının pislenmesi, toprak zehirlenmesi gibi problemleri ortaya çıkarmaktadır. Günümüzde çevre kirliliği, görüntü kirliliği ve depolama sıkıntısı oluşturan atık lastiklerin geri kazanılması önemli bir potansiyeli açığa çıkarmaktadır.

Avrupa Lastik ve Kauçuk Üreticileri Birliği'ne göre, Avrupa Birliği'nde 289 milyon lastik her yıl satılmıştır ve bu dünya pazarının sadece %20'sine denk gelmektedir [1]. Bu da dünyada her yıl yaklaşık 1,5 milyar lastik satılması demektir. Bu devasa rakamın yanı sıra lastiklerin biyolojik olarak bozulması zor malzemelerdir ve bozulması yüz yıllar alacağı düşünüldüğünde lastiklerin geri dönüştürülmesini kaçınılmaz

kılmaktadır. Kullanılmış araç lastikleri inşaat balyaları, genleşme derzleri, kaplama, stabilizasyon, karbon ürünleri, spor / oyun yüzeyleri, çimento malzemesi ve ses bariyerleri olarak kullanılabilir [2]. Bunlara ek olarak, atık araç lastiklerinin piroliziyle lastik piroliz yağı elde edilebilir. Son yıllarda, atık araç lastiklerinden yakıt elde etme olasılığı, özellikle bir piroliz yöntemiyle çekici hale gelmiştir, çünkü önceki literatürde büyük bir potansiyele sahip olduğu bildirilmiştir.

Bu çalışma iki önemli amaca hizmet etmektedir. Çalışmanın ilk amacı çevre kirliliğinin bir nebze olsun azaltılmasıdır ki, çalışmada atık lastiklerin değerlendirme yönetimi olan piroliz kullanılmıştır. Böylece doğada yüzyıllarca kendiliğinden kaybolmayan, çevre kirliliği, görüntü kirliliği ve depolama sıkıntısı oluşturan atık lastiklerin geri kazanılması sağlanmıştır. Çalışmanın ikinci aşamasında ise fosil kökenli yakıtlara olan bağlılığı geri dönüşüm ile bir miktar da olsa azaltmak amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda atık lastikten elde edilen pirolitik yakıtın, yakıt özelliklerinin iyileştirilmesi için farklı kimyasal proseslerden geçirilmiştir. Sonrasında hacimce farklı oranlarda saf dizel ile harmanlayarak bir dizel motorda yanma, performans, egzoz emisyon özellikleri üzerine etkileri deneysel olarak incelenmiştir.

## BÖLÜM 2

### ATIK TAŞIT LASTİKLERİ VE PİROLİZİ

#### 2.1. ATIK TAŞIT LASTİKLERİNİN GENEL ÖZELLİKLERİ

Lastikler kauçuk maddeden oluşur. Karmaşık kimyasal yapıları dolayısı ile geri dönüşümleri de zordur. Dolayısı ile yakıt olarak alternatif bir yakıt maddesi haline getirilmesi de zorlu işlemler sonucu yapılır. Yüksek ısı enerjisi değerine sahip olan ulaşım aracı lastiklerinin bir alanda saklanabilmesi zordur ve akabinde birçok çevresel sorunları da ortaya çıkarmaktadır.

Lastikler omuz, sırt, gövde, yanak ve damak kısımlarından oluşmaktadır. Sırt denilen bölge lastiğin yolun yüzeyine değdiği kısımdır, kauçuk içerir. Çelik kuşaklar ise şeklini korumaya yarar. Keza bunlar da yine kauçuk tabakalardan yapılır. Aşağıda Çizelge 2.1.'de Ağır taşıt ve otomobillerin lastik içeriklerindeki materyallerin dağılımı gösterilmiştir [3].

Çizelge 2.1. Binek ve ağır taşıt lastiğinin yapısında bulunan bileşenler.

| Malzeme                | Otomobil (% Ağırlık) | Ağır Vasıta (% Ağırlık) |
|------------------------|----------------------|-------------------------|
| Kauçuk/Elastomerler    | 47                   | 45                      |
| Karbon siyahı ve silis | 21.5                 | 22                      |
| Metal                  | 16.5                 | 25                      |
| Tekstil                | 5.5                  | -                       |
| Çinko oksit            | 1                    | 2                       |
| Kükürt                 | 1                    | 1                       |
| Çeşitli katkıları      | 7.5                  | 5                       |

Taşıtların lastikleri çok sayıda parça ve elementin bir araya gelmesi ile oluşur. Bir otomobil lastiğinde yaklaşık 50 bileşen bulunur; daha büyük araçlarda veya iş makinesinde ise bu sayı 150'ye kadar yükselebileceği gözlemlenmiştir [3].

Taşıt tekerleklerinin ağırlıkları; boyutuna, içeriğine ve kullanım sebebine bağlı olarak değişir. Ortalama olarak, binek bir araç lastiğinin ağırlığı 8 kg'dır ve kullanım ömür uzunluğu değişkende olsa yaklaşık olarak 2 kg civarı kaybı olur. Lastik ağırlıkları 4X4 araçlar da 10-12 kg, iş makineleri, kamyon, tır gibi ağır vasıta araçlarda 50 kg'a kadar ulaşmaktadır [3]. Lastikler içerdiği yüksek karbon gereğince çok fazla yanma özelliğine sahiptir, alt ısı değeri odun türevi yakıtlardan fazladır.

Dünyamızda atık lastikler genel olarak gemi ön bölgelerinde muhafaza amacıyla, park ve eğlence bahçelerinde muhafaza amacıyla, demir çelik fabrikalarında hammadde olarak, çimento sanayisinde hammadde olarak, spor salonlarında ve tüm bunlara ek olarak piroliz yöntemi ile alternatif bir yakıt üretmekte kullanılabilir. İnsanların atık lastikleri bilinçsiz kullanması ve bu lastiklerin muhafaza edilmesinin zorluğunu düşünecek olursak geri dönüşüm bir hayli önemlidir. Bilinçsiz toplumlarda insanlar atık lastikleri yakarak dünyamıza ve canlılara zarar vermektedir. Lastikler parçalanmadığı ve ayrışmadığı için kontrollü bir şekilde muhafaza edilip bilinçli bir biçimde değerlendirilmesi gerekir. Atık lastiklerin kontrolsüz muhafaza edilmesi ile oluşan istifler akarsu ve çayları tıkeyabilir, hatta suyu akış yönlerine tesir ederek kanalların tıkanmasına bile sebep olabilirler. Atık lastiklerin bilinçsizce biriktirilmesi sonucu olası yangınlarda fazlasıyla riski de beraberinde getirmektedir. Yangın akış yönünde toplu atık lastiklerin bulunması ve yangının atık lastiklere sıçraması sonucu içerdiği bileşimler yangının hızla yayılmasına sebep olur ve bu yangınlardan toprağa yayılan maddeler su, bitki ve hatta hayvanların sağlığı için de çok büyük tehlike oluşturur.

## **2.2. ATIK TAŞIT LASTİKLERİNİN PİROLİZİ**

Piroliz, organik maddelerin oksijen içermeyen ortamda ısıtıldığında meydana gelen temel parçalanma sürecidir. Bu işlem sonucunda lastiklerden pirolitik yağ eldesi yapılır.

Hidrokarbon yapısı olan materyallere (lastik, plastik vb.) uygulanan ısıl enerji dönüşüm süreçleri gazlaştırma, sıvılaştırma ve pirolizdir. Bu değişimlerin amacı temiz bir enerji elde etmek içindir. Petrol ve yakıt dışı materyallerden alternatif enerji üretmek amaçlanır. Bu genel amacın yanında taşıma kolaylığı, yenilenebilir enerji eldesi ve daha az gaz emisyonu amaçlanır. Piroliz için kullanılması gereken ısı malzemenin kimyasal yapısını bozacak ve yeni madde için oluşum sağlayacak düzeyde olmalıdır. Bu bağlamda atık lastikler için piroliz işlemi içeriğindeki kauçuk malzemesinin bozulmasını hedefler.

Piroliz işlemi genellikle oksijensiz ortamlarda ve 300-900 °C aralığında gerçekleşir. Piroliz işlemi 4-6 MJ/kg-kauçuk aralığında gerçekleşen bir işlemdir [4]. Piroliz işleminde gaz, karbon siyahı ve yağ olarak üç ürün meydana gelir.

Piroliz işleminin yapıldığı sıcaklığa bağlı olarak ürünler değişim gösterir. Mesela 300-400 °C arasında gerçekleştiğinde herhangi bir sıvı üretimi gerçekleşmez, fakat sıcaklığı 700 °C'nin üzerine çıkarıldığında sıvı ürünler parçalanır ve metan, etan gibi gazlar açığa çıkar [4]. Ortaya çıkacak olan ürünlerin kalitesi ve ağırlığı piroliz işleminin sıcaklığına göre değişir. Piroliz işlemi yapıldığında lastiğin tamamı geri dönüştürülmüş olur, aynı zamanda da piroliz sonucu elektrik enerji üretimi gerçekleştirilebilir.

Atık lastiğin pirolizinden meydana gelen pirolitik yağ, özellikleri iyileştirildiğinde alternatif bir yakıt olarak taşıtlarda kendine yer bulabilir. Pirolitik yakıtın özellikleri kükürt içeriğinin ve viskozitesinin azaltılması ile dizel yakıtının özelliklerine yaklaştırılarak dizel yakıt ile beraber belli oranlarda kullanılabilir.

## BÖLÜM 3

### DİZEL MOTORLARDA YAKIT ÖZELLİKLERİ, YANMA VE EMİSYONLARIN OLUŞUMU

#### 3.1. DİZEL MOTORLARDA YAKIT ÖZELLİKLERİNİN EMİSYON VE PERFORMANSA ETKİLERİ

Dizel motorlar yüksek ısı verim, dayanıklılık, yakıt ekonomisi ve sağlıklarından dolayı tarım, ulaşım ve sanayi gibi çeşitli sektörlerde kullanılmaktadır. Birçok avantajı olmasına rağmen zararlı gaz emisyonlarından ötürü çevreye verdiği zararları bir hayli konuşulmaktadır. Canlıların sağlığı açısından içerdiği olumsuzluklar nedeniyle bu emisyonlar ile ilgili düzenlemeler gelişmiş ülkelerde daha da fazla olmak üzere tüm dünyada araştırılmaktadır. Ayrıca, kişi başına düşen araç sayısının giderek artmasıyla orantılı olarak yakıt rezervlerinin azalması birebir ilişki içindedir. Özellikle emisyon ölçüm değerlerine hayli uzak olan eski model dizel araçların trafikten men edilmesi için çalışmalar sürmektedir. Dünyadaki sınırlı enerji oluşumu ve talebin düzenli olarak artması araştırmacıları dizel yakıtın kalitesini iyileştirme üzerine çalışmalara sevk etmiştir. Dizel motorların performansı, yanma verimi ve emisyonları yakıt özelliklerine, kompozisyonuna, kalitesine ve motorun çalışma parametrelerine bağlı olarak değişir. Dizel motorlar, önemli ölçüde is ve nitrojen oksit emisyonu üretir.

##### 3.1.1. Setan Sayısı

Setan sayısı, ateşleme özelliklerinin bir ölçüsünü sağlar ve yanma davranışını, motorun çıkış gücünü ve kirletici emisyonlarını etkileyen en önemli özelliklerden biridir. Setan sayısı, özellikle düşük sıcaklık koşullarında, otomatik ateşlemeyle yakından bağlantılı bir yakıt özelliğini temsil eder. Setan sayısı dizel yakıtın tutuşabilme kalitesidir. Yakıtın setan sayısı, kaynama noktası ve aromatik içerik ile de



ilişkilidir [5]. Setan sayısı düşük bir yakıt, sıkıştırma ve sıcaklık artımı başladığında kendiliğinden tutuşamayarak yakıt karışımının yoğunluğunu artırır ve motorda gürültü yapar. Aynı zamanda ağır hidrokarbon içerir ve yakıt yoğunluğu fazladır [6]. Düşük setan içerikli yakıt ile çalıştırılan bir motorda yanma geç olur ve tutuşma gecikmesinden dolayı soğuk havalarda ilk çalışmada zorlanma görülür ve emisyonlarda olumsuzluklar yaşanır [7]. Setan sayısı yüksek olan yakıtın tutuşma kalitesi, tutuşabilirliği yüksek demektir. Setan sayısının yüksek olması motor sesini azaltır, soğuk havalarda çalışma performansını artırır hem de emisyon değerlerini iyileştirir, motor daha yumuşak çalışır. Yüksek setan sayısına sahip yakıt kullanıldığında, yanma odasında hava yakıt karışımı daha küçük sıkıştırma oranlarında tutuşabilir. Bu işlem de patlama koşullarına ulaşmayı sağlar. Yani bu şekilde hem emisyon değerlerinde düşme olur hem de motor sesi azalmış olur.

Çok yüksek setan sayısına sahip yakıtlarda ve düşük setan sayılı yakıtlarda çeşitli olumsuzluklar yaşanabilmektedir. Bu yüzden, çok yüksek veya çok düşük setan sayısı içeren dizel yakıtlar motorun çalışmasını etkilediğinden, setan sayısının belli aralıklarda olması istenir. Ortalama setan sayısı dizel motorlarda 40 ila 60 arasında olmalıdır. Setan sayısı artırılmak istendiğinde setan artırıcı katkı maddeleri kullanılabilir, fakat bu maddeler de yakıtın diğer özelliklerine zarar verebilir [8,9].

### **3.1.2. Yakıtın Kükürt İçeriği**

Kükürt, petrol türevlerinin her birinde yer alır. Rafinerilerde kükürt seviyesi belirli değerlere çekilmeye çalışılır. Dizel yakıt içerisindeki kükürt, is emisyonu oluşumu yapar ve türlü emisyonların oluşmasına sebep olur [4].

Yakıtta bulunan kükürt; Yanma sonucu zararlı  $SO_x$  emisyonlarına sebep olur ve buna bağlı olarak da asit yağmurları meydana gelebilir. Ayrıca kükürt yakıt deposunun korozyona uğramasına sebep olur ve yakıtı kötü bir koku verir.

Tüm bu nedenlerden ötürü Avrupa Birliği ve Amerika tarafından yapılan deneysel araştırmalar sonucu araçlarda kullanılan yakıtların maksimum kükürt miktarı 50 ppm'e çekilmiştir. Bu sınır 2010 yılından itibaren 10 ppm olarak düzeltilmiştir [10].

Dizel yakıtın içinde bulunan kükürt yağlayıcı eleman gibi hareket eder, keza yakıt içindeki kükürt miktarı çok fazla azaltılırsa motor parçalarında değişik sorunları beraberinde getirebilir [7].

### **3.1.3. Distilasyon Özelliği ve Aromatik İçeriği**

Distilasyon yakıtların kaynama sıcaklık aralıklarını gösterir. T80, yakıtın %80'inin buharlaşacağı sıcaklığı ifade eder. Distilasyon ifadesi; yakıtın yoğunluğunu, viskozitesini, setan sayısı gibi özelliklerini de etkiler. Kalite kontrolü açısından oldukça önemlidir. Distilasyon sıcaklığının motorun çalışma karakteristikleri üzerindeki etkisi büyüktür %15 ya da %50 distilasyon sıcaklığı, yakıtın %15'inin ya da %50'sinin buharlaştığı andaki sıcaklığına eşittir. %15 distilasyon sıcaklığında ve soğuk havalarda motorun çalıştırılması, hızlanması vs. etkilenir.

Yakıtın içinde bulunan HC'lar yakıtın yanmasını zorlaştırır. En üst distilasyon sıcaklığının değerinin düşmesi, bu HC'ların azalmasını sağlar. Bununla beraber olarak viskozite ve yoğunluğu da azaltır.

Yakıtın distilasyon sıcaklığının üst noktası artırılırsa aromatik içeriği de artırılır. Dolayısıyla yakıtın setan sayısı, yoğunluğu, viskozitesi ve distilasyon özelliklerini de değiştirir [11]. Aromatik içeriği yüksek olan yakıtlar, yoğunluk ve T90 sıcaklığı yüksek ve setan sayısı düşük olur. Aromatik içerik azaltıldığında NO<sub>x</sub> ve is emisyonlarını azaltarak, yakıt sarfiyatını da bir miktar azalttığı ifade edilmiştir [12].

### **3.1.4. Yakıtın Yoğunluğu**

Yoğunluk, yakıtın birim hacminin kütlesini ifade eder, yakıtın enerji içeriği hakkında bilgi verir. Dizel yakıt birden fazla hidrokarbon karışımdan oluşur. Yoğunluk; setan sayısı, aromatik içerik, viskozite ve distilasyon özellikleri ile birebir ilişkilidir. Yakıt yoğunluğu NO<sub>x</sub> emisyonu ve partikül oluşumunda önemli faktörler arasındadır.

Dizel yakıtın yoğunluğu artırıldığında püskürtülen yakıtın kütlesi artacağından is emisyonunun artmasına sebep olur. Bunun yanı sıra yakıt yoğunluğunun az olması da tüketilen yakıtı artırır.

Dizel yakıt yoğunluğu artırıldığında püskürtülen yakıt artış göstereceği için is emisyonlarında olumsuzluk gösterebilir.

### **3.1.5. Yakıtın Viskozitesi**

Viskozite, bir akışkanın, yüzey gerilimi altında deforme olmaya karşı gösterdiği direncin ölçüsüdür. Akışkanın akmaya karşı gösterdiği iç direnç olarak da tanımlanabilir. Bir sıvının bir başkasının üzerinde hareket eden sıvısının bir kısmının iç sürtünmesi nedeniyle bir sıvının akışına karşı bir direnç ölçüsü olan viskozite, yanma odasına enjeksiyonun ardından bir yakıtın atomizasyonunu ve sonuç olarak motor birikintilerinin oluşumunu etkiler. Genel olarak viskozite arttıkça; püskürtme atomizasyonunu ve yakıtın hava ile karışmasını olumsuz yönde etkiler.

Kinematik viskozite, dinamik viskozitenin yoğunluğa oranıdır. Sıvı yakıtların viskozitesini belirtir. Sıvı yakıtlar için akışkan viskoz ise, hareket kolaylığı artar. Sıkıştırma ateşlemeli motorlarda, düşük viskozite değerleri yakıt spreyinin daha hızlı atomizasyonunu kolaylaştırmak için elverişlidir; bu da kontak gecikme süresini azaltır. Öte yandan mekanik yakıt pompaları ile ilgili olarak daha yüksek kinematik viskozite, yakıt kaçağı kayıplarının azalmasına neden olur, bu da daha yüksek enjeksiyon basınçlarına yol açar [13].

Yüksek viskozite yakıtın hızını azaltır ve pompanın daha fazla güç çekmesini veya düzgün çalışmamasına sebep olabilir. Yüksek viskoziteli yakıtlar zor püskürtülür ve tutuşma gecikmesi yapar [14]. Yakıt viskozitesi daha da arttıkça motor performansı olumsuz yönde etkilenir.

Düşük viskozite pompanın içindeki yakıtta kaçak oluşturur ve yakıtın miktarında azalma yapar. Bu şekilde motorun performansını olumsuz etkiler. Ayrıca yağlama özelliğini de olumsuz etkiler [4].

### **3.1.6. Yakıtın Enerji İçeriği**

Enerji içeriği, yakıtın verebileceği enerji miktarını belirtir. Yani yakıtın alt ve üst ısıl değerleri olarak söylenebilir. Her yakıtın içerdiği enerji içeriği farklıdır. Rafinerilerde üretilen dizel yakıtların her bir üreticisinde farklı enerji içerikleriyle karşılaşılabilir. Enerji içeriği yüksek olan yakıtların tercih edilmesi genelde yakıt ekonomisi sağlar.

### **3.1.7. Yakıtın Kl İçeriği**

Yanma sonunda yakıtın bıraktığı artıklardır. Kl, petrol ürünlerinde oluşan yanmaz kk bileşenlerdir. Kl, motor içerisindeki mekanik elemanları büyük lde zarar verir ve aynı zamanda egzoz supabı yüzeylerinde birikerek supapların yanmasına sebep olur. Dolayısı ile kül motorda istenmeyen bir etkidir [15]. Kl içeriği fazla olan yakıtlarda motor parçalarını oluşturan elemanlarda korozyon oluşumu gözlenmektedir, bu durumda da motorun performansı menfi yönde etkilenmektedir [16].

### **3.1.8. Atık Karbon İçeriği**

Dizel yakıtın motorda yakılması ile motor içerisinde karbon birikintisi oluşturma olasılığını ifade eder. Bu oluşan karbon birikintileri diğer parçalarda fazla ısı ve korozyona neden olabilir. Bu oluşan ısı motor performansını da olumsuz etkiler. Dizel yakıttaki karbon zinciri karışımları genellikle her molekülde 8-21 arsında karbon atomu içermektedir. Karbon oranı yüksek olan yakıtların yanması zor olur ve emisyonun artmasına sebep olur. Aynı zamanda hidrokarbon ve is emisyonlarını da artırır [16].

### **3.1.9. Parlama Noktası**

Parlama noktası, sıvı bir deponun içerisinde ısıtılırken üstten çıkmış olan buhara alev kaynağıyla temas ettirildiğinde tutuşacağı en düşük sıcaklıktır. Alevlenme özelliğini gösterir. Parlama noktasının belirli bir derecenin altında olması, motorda düzensiz ve

kontROLSÜZ bir yanmaya sebep olabilmektedir. Yüksek parlama noktasına sahip olan yakıtların uçuculuğu daha düşüktür [17].

### **3.1.10. Soğuk Akış Özellikleri**

Dizel yakıt parafin içerir. Düşük sıcaklıklarda bu ağır parafin molekülleri ayrışır ve çökülürler. Yakıt soğutulmaya alınıp kontrollü bir şekilde soğutulurken akmaya devam edebildiği son sıcaklığa akma noktası adı verilir. Akma sınırı yakıtın zor pompalanmasına sebep olur ve filtreleri tıkar. Düşük kükürt içerikli yakıtlarda akma noktası daha yüksektir [4].

### **3.1.11. Yağlayıcılık Özelliği ve Oksidasyon Kararlılığı**

Dizel motorlarda yakıt sisteminde kullanılan elemanların yağlama ihtiyaçlarını sağlayan yakıt yağlar. Yakıtın parçaları ne kadar yağladığı yağlayıcılık özelliğinin bir ölçüsüdür. Dizel yakıtın içerisinde bulunan en yağlayıcı bileşen ise kükürttür. Kükürt yerine farklı katkılarda kullanılabilir. Oksidasyon ise, yakıtın oksijenle tepkimeye girerken karşıt olarak göstermiş olduğu dirençtir. Oksidasyon sonucu tortu oluşumu olabilir ve bu da filtreleri tıkaşabilir [16].

## **3.2. DİZEL MOTORLARDA KARIŞIM TEŞKİLİ VE YANMA**

Dizel motorlarda yanma kendi kendine gerçekleştiğinden buji ateşlemeli motorlarda yanmaya göre daha karışık bir kimyasal süreçtir. Dizel motorlarda yanma tutuşma gecikmesi, hızlı yanma, kontrollü yanma, son yanma olmaz üzere dört kısımda incelenebilir.

Tutuşma gecikmesi: Tutuşma gecikmesi enjektörün açılmasından yakıtın yanmasına kadar geçen süre olarak tanımlanabilir. Tutuşma gecikmesi fiziksel ve kimyasal gecikme olarak iki kısma ayrılır. Tutuşma gecikmesi emme hattın yapısına, motor soğutma sistemine, yağlama sistemine, enjektör basıncına, hava emiş basıncına, püskürtme zamanlamasına, yanma odası tasarımına, yakıt tipine, yakıtın kimyasal özelliklerine (setan sayısı, viskozitesi gibi) ve motor hızını da içeren birçok olgunun

etkisi altındadır. Enjektörden püskürtülen yakıt atomize olur, sıkışan ve ısınan havanın sıcaklığı ve yanma odası sıcaklığı ile buharlaşır. Buharlaşan yakıt hava ile karışarak yanma için uygun koşulları oluşturur ve yanar.

Hızlı yanma: Yanmanın başlaması ile silindir içi basıncın pik noktaya ulaşması arasında geçen süre hızlı yanma kısmını oluşturur. Bir önceki kısımda oluşan hava yakıt karışımı tutuşarak yanmaya başlar ve silindir içi sıcaklık ve basınç yanmanın etkisi ile aniden yükselir. Eğer tutuşma gecikmesi artarsa biriken yakıt daha hızlı yanarak daha ani basınç artışı ve ısı salınım oranına sebep olur. Hızlı yanma kullanılan yakıtta, yakıtın atomizasyon miktarına, karışımın homojenliğine, tutuşma gecikmesine, hava yakıt oranına ve püskürtülen yakıt ile doğrudan ilişkilidir.

Kontrollü yanma: Hızlı yanmadan sonra yanma sonu sıcaklığının pik yaptığı zamana kadar süren kısım kontrollü yanmanın genel olarak ifade edilmiştir. Bu bölgede basınç ve sıcaklık artış oranı genel olarak hızlı yanmadan daha yavaştır. Kontrollü yanmada hızlı yanmada yanmamış yakıtlar ve enjektörden püskürtülen yakıtlar yanar.

Son yanma: Kontrollü yanmanın bitişinden genişleme zamanına kadar devam eden süreci son yanma kısmı oluşturur. Son yanma eksik yanmış yakıt zerreciklerini ve yanmamış yakıtların hava ile teması ile yanmasıdır. Son yanma işlemi egzoz gazlarının bir miktar ısınmasını sağlayarak yanmayı ve emisyon değerlerini kötüleştirir.

### **3.3. DİZEL MOTORLARDA EMİSYONLARIN OLUŞUMU**

Petrol fiyatlarının yüksekliği, dizel motor verimliliği ve düşük yakıt tüketimi gibi sebeplerden ötürü dizel motorlu araçlar benzine nazaran daha fazla kullanıma sahiptir. Fakat dizel motorlar CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub> gibi hava kirliliğine sebep olan emisyonlarının oluşumuna sebep olurlar. Bunlardan kontrol altına alınması gereken en tehlikeli olanı NO<sub>x</sub> emisyonudur. NO<sub>x</sub> emisyonlarının toplum ve canlı sağlığı üzerindeki olumsuz etkileri vardır. Günümüzde sivil toplum kuruluşlarının dizel yakıt emisyonlarından ettiği şikâyetin temel problemi NO<sub>x</sub> emisyonlarıdır. Ozon (O<sub>3</sub>) atmosferin üst tabakasında oluşan ve dünyayı güneşten gelen ultraviyole ışınlar karşı koruyan oksijenin reaktif şeklidir. Ancak atmosfer altında kirletici emisyonların etkisiyle

meydana gelen oluşumlar ozon tabakası için oldukça tehlikelidir. NO kirletici emisyonları havaya salındığında havada bulunan O<sub>2</sub> ile tepkimeye girerek NO<sub>2</sub> formuna dönüşmekte ve arzu edilmeyen atmosfer altı ozon oluşumuna sebebiyet vermektedir. Bu şekilde oluşan ozon küresel ısınmaya yol açmakta, insan sağlığı ve çevre üzerinde ciddi tahribatlara neden olmaktadır [18].

### **3.3.1. Partikül Madde ve İis Emisyonları**

Dizel motorda eksik yanma olayı gerçekleşirse is oluşur, yani püskürtülen yakıt zerreciklerinin tam yanmaması sonucu oluşurlar. Bunun yanı sıra motor yağından kaynaklı is oluşumu da gerçekleşebilmektedir. Partiküller solunum rahatsızlıklarına sebep olabilir. Partikül emisyonunu azaltmak için partikül kapanları geliştirilmektedir. Kükürt partikül emisyonunu ortaya çıkaran nedenlerdendir ve düşük kükürtlü yakıt kullanıldığında bu emisyon değeri de azalacaktır.

Motordaki is emisyonu oluşumu motor yüküne bağlı olarak değişir. Motor yükü arttığında motorun içindeki oksijen azalır ve yanma periyodu uzar. Bu zamanda is emisyonunun oluşmasına sebep olur [19].

### **3.3.2. Nitrojen Oksit (NO<sub>x</sub>) Emisyonları**

NO<sub>x</sub> emisyonları çoğunlukla nitrojen monoksit (NO) ve nitrojen dioksitten (NO<sub>2</sub>) oluşur. Genel olarak NO<sub>x</sub> olarak literatürde yerini almıştır. NO<sub>x</sub> emisyonlarının büyük bir çoğunluğunu NO emisyonları oluşturur.

Bir dizel motorda NO oluşumunu etkileyen ana faktörler, silindir sıcaklığı ve oksijenin fazla girişidir. Yüksek yanma sıcaklığı (1700 K'nin üzerinde) azot moleküllerinin güçlü üçlü bağını kırar ve oksijenle reaksiyona girerek yüksek oranda reaktif azot üretir [20].

NO emisyonları solunum rahatsızlıklarına sebep olur ve etkisini hemen gösteren bir gazdır. NO<sub>2</sub>'yi solumuş bir kişi farkında olmadan soluyabilir ve yaşamını yitirebilir. Bu emisyonlar sadece insanlara değil bitkilerin de büyümesini engelleyebilir [21].

NO<sub>x</sub> emisyonları büyük ölçüde sıcaklığa bağlıdır. Sıcaklığın 1400 °C'yi geçtiği durumda silindirin içerisinde ki havada bulunan N<sub>2</sub> gazı ile Oksijen tepkimeye girip NO<sub>x</sub> emisyonunu oluşturur. Bunun yanında oksijenin lokal konsantrasyonuna ve yanma süresine bağlıdır. Diğer önemli faktörler ise, püskürtme zamanı, yanma odasına alınan dolgunun sıcaklığı, türbülans, yakıt özellikleri vb. gibi parametrelerdir. Yapılan araştırmalara göre, NO<sub>x</sub> emisyonların oluşumu büyük oranda ani yanma fazında gerçekleşmektedir [22,23].

### **3.3.3. Hidrokarbon (HC) Emisyonları**

Dizel motorlardaki HC emisyonları, parçalanmış yakıt moleküllerinden oluşur. Bazı hidrokarbonlar kanserojen özellik içerirler. HC emisyonları tutuşturulamamış yakıt parçacıklarından oluşur. HC oluşumunun esas kaynağı, yanma odasındaki karışımın tutuşamayacak kadar düşük olduğu zamandır [23]. Yakıtın tam yanmaması veya buharlaşması sonucunda meydana gelir. Yanmanın tam anlamıyla gerçekleşebilmesi için yeterli oksijen gerekir ve bu oksijen bulunmadığında HC emisyonları artış gösterecektir.

HC emisyonları birkaç şekilde meydana gelir. Bunlar, eksik yanma, silindir içinde bulunan karbon partikülleri, silindir içerisinde oluşmuş alev sönmesi, püskürtme sisteminde oluşan sorunlar, silindir içerisinde kalmış sıvı yakıt HC emisyonuna sebep olabilir.

### **3.3.4. Karbon monoksit (CO) Emisyonları**

CO emisyonu, egzoz gazlarında bulunan en toksik maddedir ve renksiz, tatsız ve kokusuzdur. CO emisyonları, hidrokarbon yakıtlarının tam olarak yanmadığında oluşan bir üründür [24]. CO emisyonlarının %90'a yakını otomobil kaynaklıdır. CO solunum yetmezliği yaratır ve görüş bozukluğuna sebep olabilir. CO emisyonu dizel araçlarda benzinli araçlara nazaran daha az üretir.

Yanma odasında yetersiz oksidanın ve düşük sıcaklığın sebep olduğu eksik yanma dolayısı ile CO emisyonları oluşur. Yanmanın sonuna doğru oluşan CO



emisyonları, değişik oksidanlarla birleşme tepkimesine girerek CO<sub>2</sub> emisyonlarına dönüşürler. Düşük yanma odası sıcaklığı ve yetersiz oksidan seviyesinden dolayı gerçekleşemeyen birleşme tepkimeleri, CO emisyonlarının artmasına neden olur.

Yakıtça zengin karışımlar daha çok CO emisyonu üretirler. Ancak, dizel motorlar hava fazlalığı ile çalıştığından CO emisyonları oldukça düşüktür. Dizel motorlardaki yanmanın her safhasında, yüksek yanma sıcaklığı, oksijen miktarının fazlalığı, karışım teşkil hızının yüksek oluşu CO emisyonlarının oksidasyonuna yardım eder.

## BÖLÜM 4

### LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

#### 4.1. ATIKLARDAN ELDE EDİLEN YAKITLARIN DİZEL MOTORLARDA KULLANIMI

Dünya genelinde kirletici gazların azaltılması ihtiyacı, hızlı endüstrileşme ile artan enerji talebi, enerji kaynaklarının yetersizliği gibi sebepler araştırmacıları günümüz enerji kaynaklarının özelliklerine yakın ve daha temiz enerji kaynakları araştırmaya yöneltmiştir. Trafikte her geçen gün artan taşıt sayısı ile birlikte, içten yanmalı motorlar dünya enerji talebini ve kirletici emisyonları artıran önemli bir unsur haline gelmiştir. Bu yüzden içten yanmalı motorların fosil kökenli yakıtlara bağımlılığının ve kirletici emisyonlarının azaltılması gerekir. İçten yanmalı motorlarda fosil kökenli yakıtların kullanımının azaltılması yönünde yapılan çalışmalar ağırlıklı olarak alkol ve biyodizel çalışmalarından oluşmaktadır. Ancak, bitkisel kökenli alkol ve biyodizel yakıtlarının enerji kaynağı olarak kullanımının artışı, insanoğlu için bir başka tehlike olan temel besin kaynaklarının fiyatlarının artmasına ve dolayısı ile dünya üzerindeki açlığın artmasına sebep olabileceği senaryoları düşünülmektedir. Bitkisel kökenli yakıtların üretimi için, atıklardan veya besin olarak kullanılmayan bitkilerden faydalanılması daha uygun bir yöntem olabilir [9]. Doğal kaynakların kullanımının azaltılması açısından evsel, bitkisel, endüstriyel ve katı atıklardan alternatif yakıt üretimi önem taşımaktadır. Bu yüzden, doğal kaynakların kullanımının azaltılması için atıklardan enerji elde edilmesi cazip hale gelmiştir.

Dizel motorlar için atıklardan alternatif yakıt geliştirilmesi son yıllarda artış göstermektedir. Atık kızartma yağlarından veya yemek yağlarından biyodizel üretimi, özellikle üretilen biyodizelin maliyetini düşürmek açısından önemlidir.

Motor performansı ve emisyonlar açısından önemli bir negatif etki olmaksızın atık yemek yağlarından elde edilen biyodizelin dizel motorlarda kullanımı deneysel çalışmalar ile literatürde gösterilmiştir [25-30].

Genellikle atık odun talaşlarından elde edilen yakıtlar yüksek viskoziteli ve oksijen içerikli, asidik ve ısıl değerleri düşüktür. Ayrıca, dizel yakıtlarla faz ayrışması problemi olduğu literatürden anlaşılmaktadır. Prakash ve arkadaşları tarafından yapılan bir çalışmada, atık odun talaşlarının vakum piroliz yöntemi kullanılarak piroliz edilmesi ile elde edilen pirolitik yakıt ile dizel yakıt %10 hacimsel oranda karıştırılmış ve oluşturulan yakıt harmanına %2 ve %4 dietiler ilave edilmiştir. Oluşturulan yakıt harmanlarına dietiler ilavesi motor performansı açısından olumlu etki yapmasına karşın CO, HC ve NO<sub>x</sub> emisyonlarını artırmıştır [31].

Diğer bir çalışmada ise odun kökenli yakıtın %30'a kadar dizel yakıtı ilavesi ile NO ve HC emisyonlarında iyileşmeler sağlanırken, CO emisyonlarında artışın olduğu ifade edilmiştir [32]. Atık motor yağlarının pirolitik distilasyonu ile elde edilen dizel benzeri yakıt, motor performansı açısından tatminkâr sonuçlar vermesine karşın, emisyonlar açısından negatif etkiler göstermiştir. Özellikle SO<sub>2</sub>, CO ve NO<sub>x</sub> emisyonlarında artış olduğu ifade edilmiştir [33-35].

Mani ve arkadaşları tarafından yapılan bir çalışmada, atık plastiklerden elde edilen pirolitik yakıt ve standart dizel yakıt tek silindirli direkt püskürtmeli bir dizel motorda test edilerek motor performansı ve emisyonlarla birlikte yanma karakteristikleri incelenmiştir. NO<sub>x</sub>, CO, HC ve is emisyonları, tutuşma gecikmesi ve P<sub>maks</sub>, efektif verim ve T<sub>Egzoz</sub> artış göstermiştir [36].

Aynı yazarlar tarafından yapılan diğer bir çalışmada ise [37], EGR'nin atık plastiklerden elde edilen pirolitik yakıtla çalışan dizel motora olan etkisi incelenmiş ve EGR uygulamasının NO<sub>x</sub>, HC ve is emisyonlarını önemli ölçüde iyileştirdiği ve CO emisyonlarını bir miktar artırdığı ifade edilmiştir. Atık plastiklerden elde edilen pirolitik yakıtın dizel motorda kullanımı ile yapılan diğer bir çalışmada ise is emisyonları önemli ölçüde iyileşme göstermiştir. NO<sub>x</sub>, HC ve

CO emisyonları ise artmıştır [38]. Yakıt püskürtme avansının etkisini incelemek için yapılan bir çalışmada ise atık plastiklerden elde edilen pirolitik yakıtın püskürtme başlangıcının geciktirilmesi ile NO<sub>x</sub>, HC ve CO emisyonları iyileşirken is emisyonlarının ve efektif verimin de arttığı ifade edilmiştir [38]. Genel olarak, atık plastiklerden elde edilen yakıtın bir miktar EGR ile ve püskürtme avansının geciktirilmesi ile dizel motorlarda kullanılması hem emisyonlar açısından hem de performans açısından olumlu bir etki yapmaktadır.

Sürdürülebilir enerjiler konusunda yapılmış araştırmalarda biyokütle için çok büyük bir enerji kaynağı gözüyle bakılmaktadır. Bitkilerin yapmış olduğu fotosentez işlemiyle kazanım sağladıkları enerji, dünyanın harcamış olduğu enerjiyi yaklaşık olarak on kat karşılayabilecek kadar fazladır. Biyoenerji odun, bitki ve hayvansal atıklardan elde edilir [39].

Piroliz, uygulandığı maddenin cinsine göre farklılık göstermesine rağmen, maddenin oksijensiz bir ortamda ısıl bozulmalara bırakılması sonucu elde edilen üründür. Piroliz sayesinde bitkisel ve hayvansal atıklardan elde edilen biyokütlenin, petrol yakıtlarına yakın derecede yakıt eldesi sağlanmıştır [40].

Uyumaz ve arkadaşları tek silindirli, direkt enjeksiyonlu, 2200 dev/dak. maksimum tork hızında hava soğutmalı dizel motorlu taşıt üzerinde yapılan deneyde 3.75, 7.5, 11.25, 15 Nm'lik dört farklı motor yükünde deneysel inceleme yapılmıştır. Motor basıncı arttıkça atık lastik yağı yakıt karışımı ile silindir içi basınç arttığı çalışmada belirtilmiştir. Test yakıtları için motor yükünün artmasıyla ateşleme gecikmesi azalmış, ancak atık yağ ilave edildiğinde arttığı gözlenmiştir. Test sonuçları incelendiğinde, atık lastik yağının yanma özelliklerini, performansını ve emisyonları oldukça etkilediği görülmüştür [41].

Hürdoğan ve arkadaşları %10 ve %20 pirolitik yakıt-dizel karışımı yakıt ile yapmış olduğu deneylerde tüm yakıtlar için artan motor devriyle CO emisyonlarının arttığını gözlemlemişlerdir. CO<sub>2</sub> emisyonunun değişimi %10 pirolitik yakıt %90 dizel karışımında ve %20 pirolitik yakıt %80 dizel yakıt kullanıldığında değerlerde ortalama %12'lik bir düşüş vardır. Pirolitik yakıtın yüzdesi artırıldığında egzoz

gazlarının oksijen içeriğinin azaldığını gözlemlemişlerdir. Reaksiyon sıcaklığı artırıldığında NO<sub>x</sub> emisyonlarının konsantrasyonunun arttığını gözlemlemişlerdir [42].

Wang ve arkadaşlarının yaptıkları deneyde ürün verimlerinin reaksiyon sıcaklığıyla doğrudan ilgili olduğunu söylemektedirler. Piroliz sıcaklığı artırıldığında parlama noktaları, yoğunlukları, viskoziteleri ve kalorifik değerlerinin daha yüksek olduğunu gözlemlemişlerdir. Daha yüksek sıcaklıklarda 1.3 kat daha fazla kükürt içeriğine sebep olduğu görülmüştür. Normal dizel yakıt ile karşılaştırıldığında, pirolitik yakıt – dizel yakıt karışımının setan sayısı daha düşük, fakat yoğunluğun ve viskozitenin daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Kükürt içeriğinin normal dizel yakıttan daha yüksek olduğunu ve daha yüksek SO<sub>2</sub> emisyonuna neden olduğunu tespit etmişlerdir [43].

İlkılıç ve arkadaşlarının yapmış oldukları deneyde tüm test yakıtları arasında dizel yakıtın güç değerlerinin en yüksek olduğunu söylemektedir. Yakıt miktarında ki pirolitik yağ miktarı ne kadar fazla ise ilgili motorun gücünün o kadar düşük olduğunu gözlemlemişlerdir. Tork değerleri içinde pirolitik yakıt yüzdesinin fazla olduğu yakıtlarda tork gücünün düştüğünü gözlemlemişlerdir. En düşük tork değerlerinin sırasıyla TF100, TF75, TF50 yakıtları olduğunu belirtilmiştir. Tork azalmasının ana nedeni olarak pirolitik yakıtın daha düşük kalorifik değerini işaret etmişlerdir. Aynı zamanda TF100'ün en yüksek CO ve HC emisyonunu verdiği gözlemlemişlerdir. Dizel yakıt, TF5, TF10, TF15, TF25 ve TF35 yakıtlar için en düşük duman opaklık seviyeleri bulunduğu gözlenmiştir. Dizel yakıt için TF5, TF10, TF15, TF25 ve TF35 yakıtlar için opasite seviyeleri sırasıyla %66.1, % 68.92, % 73.53, % 81.16, % 83.69 ve % 88 olarak bulunmuştur. Ancak, piroliz yakıt (%100), dizel (%25) ve pirolitik yakıt (%75) ve dizel (%50) ve pirolitik yakıt (%50) yakıtları duman opaklığının ölçüm seviyelerini aştığı ve tüm hızlarda %99.9 olarak gözlendiğini söylemektedirler. Bununla birlikte, dizel (%50) ve piroliz yakıt (%50) yakıtı %96.77'lik bir opaklıkla sonuçlandığını tespit etmişlerdir [24].

Murugan ve arkadaşları %100 dizel yakıtlı bir motorda tam yükte verimin %29.45 olduğunu, %10 pirolitik yakıt içeren karışımın %27.3, %20 pirolitik yakıt içeren

karışımın %26.2 verimde çalıştığını gözlemlemiştir. Saf dizel yakıt ile %90 dizel- %10 pirolitik yakıt karışımı motorda tam yükte karşılaştırıldığında %10 pirolitik yakıt içeren karışım yakıtta termal verimde yaklaşık %3 azalma olduğu belirtilmiştir [14].

Aydın ve arkadaşları dizel (%50) ve pirolitik yakıt (%50) karışımı ile saf dizel yakıtı 2500 dev / dak motor hızında karşılaştırdığında güç değerlerinde saf dizel yakıtı göre %3.08 azalma olduğunu gözlemlemiştir. NOx emisyonları ise %25 pirolitik yakıt içeren yakıt ve %50 pirolitik yakıt içeren yakıt saf dizele kıyasla sırasıyla %40.2 ve %29.3 oranında azaltılmıştır [44].

Hürdoğan ve arkadaşları atık lastik ve atık plastikten piroliz yağlarının tek silindirli çok amaçlı tarım dizel motoruyla uygulanması araştırmışlardır. Motor modifikasyonu olmadan, lastik pirolizinin daha iyi motor performansı sunduğu, plastik piroliz yağının ısıtma değerinin daha yüksek olduğunu gözlemlemiştir. Ekonomik analiz olarak ise piroliz yağı, dizel yakıtın %85'inden fazla değilse, motor performansı ve enerji çıkışı açısından dizelin yerini alabilir olduğu vurgulanmıştır [45].

Lahane ve arkadaşları pirolitik yakıtın dizel motorların egzoz emisyonlarını azaltabilen toksik olmayan, yenilenebilir ve temiz yanan bir yakıt olarak kabul edildiğini, biyodizel üzerinde çalışan motor, mineral dizele kıyasla hidrokarbon (HC), karbon monoksit (CO) ve partikül madde emisyonunda önemli bir azalmaya neden olduğunu gözlemlemiştir [46].

## **4.2. ATIK KÖKENLİ YAKITLARIN YAKIT ÖZELLİKLERİNİN İYİLEŞTİRİLMESİ**

Atık taşıt lastiklerinden elde edilen ham pirolitik yakıt, piroliz yönteminin tasarımına bağlı olarak karbon siyahı, küçük kum taneleri ve alkali metaller içerir. Bu yüzden, supaplar, supap oturma yüzeyleri, segmanlar ve yuvaları gibi bazı motor parçalarında ve yakıt püskürtme sisteminde aşınma problemleri oluşturabilir. Ayrıca, bu katı partiküller egzoz emisyonlarını da etkiler. Bundan başka, ham pirolitik yakıtın yüksek kükürt içeriği, ham pirolitik yakıtın dizel motorlarda alternatif yakıt olarak kullanımını kısıtlar. Yakıt içerisinde bulunan kükürt

egzozdan çevreye kükürt dioksit (SO<sub>2</sub>) olarak atılır. Atmosfere salınan SO<sub>2</sub>, atmosferde bulunan su buharı ile birleşerek sülfürik asit oluşumuna yardımcı olur ve yeryüzüne asit yağmuru olarak dönerek çevre ve insan sağlığını tehdit eder. Ayrıca, taşıta ait katalitik dönüştürücünün zehirlenmesine de sebep olabilir. Bu yüzden kükürt yakıtlarda istenmeyen bir bileşen olup yakıtın içerisinde uzaklaştırılması gerekir. Aynı zamanda ham pirolitik yakıt, sakızlaşmış şekilde katı polimerler ve zift (katran) de içerebilir. Ham pirolitik yakıt içerisinde polimerlerin, ziftin (katran) ve partiküllerin varlığı enjeksiyon sistemi içerisinde tortu oluşumuna sebep olabilir. Ham pirolitik yakıtın dizel motorlarda direkt kullanımının bazı zorlukları olduğu ve yukarıda ifade edilen olumsuzluklarla karşılaşılabileceği açıktır.

Atık taşıt lastiğinden elde edilen pirolitik yakıtın ham hali ile yakıt olarak içten yanmalı motorlarda kullanılması hem motor hem de çevre açısından sakıncalıdır. Atık taşıt lastiklerinin pirolizi ile elde edilen pirolitik yakıtların yakıt özelliklerinin iyileştirilmesi, motor performansı ve emisyonlar açısından önemli bir katkı sağladığı daha önceki çalışmalarda ifade edilmiştir. Pirolitik yakıtlara özgü bir iyileştirme yöntemi henüz oluşmadığı için, literatürde kullanılan pirolitik yakıtların yakıt özelliklerini iyileştirme metotları birbirinden farklı olsa da, ağırlıklı olarak asit-kil işleme ve distilasyon yönteminin beraberce gerçekleştirildiği süreç kullanılmıştır. Bu bölümde atık taşıt lastiklerinden elde edilen pirolitik yakıtta bulunan kükürt miktarının minimize edilmesi ve yakıt özelliklerinin iyileştirilmesi için literatürde yapılan çalışmalara yer verilmiştir.

Genellikle, atık motor yağları vb. atıkların re jenerasyonunda kullanılan yöntemler literatür çalışmalarında sıklıkla karşılaşılmaktadır. Ancak, pirolitik yakıtların yakıt özelliklerini iyileştirmek için pirolitik yakıtlara has ayrı bir yöntem göze çarpmamaktadır. Literatürdeki bazı çalışmalarda, atık motor yağlarının re-jenerasyonunda kullanılan yöntemler, pirolitik yakıtın yakıt özelliklerinin iyileştirilmesi için kullanılmıştır.

Oksidatif kükürt giderme, derin kükürt giderme için alternatif bir teknoloji olarak çok dikkat edilmiştir. Oksidatif kükürt giderme temel olarak iki aşamalı bir işlem,

Oksidasyon ve ardından sıvı ekstraksiyonudur. Oksidatif kükürt giderme işleminde; kükürt içeren bileşikler, bu bileşiklere karşılık gelen sülfoksitlere ve sülfonlara dönüştürmek için uygun oksidanlar kullanılarak oksitlenir [47].

Benzin ve dizel yakıtların kükürt giderilmesi, formik asit ve asetik asit gibi bir asit katalizörü varlığında sülfür içeren bileşiklerin hidrojen peroksit ile kimyasal olarak Oksidasyon ve ardından asetonitril kullanılarak oksitlenmiş bileşiklerin ekstraksiyonu ile araştırılmıştır. Dizel yakıtın oksidatif kükürt gidermesinin %92'ye kadar azaltılması çok umut verici gelişme olmuştur. Standart dizel yakıtın kükürt seviyesi orijinal 1044 ppm değerinden 100 ppm değerinin altına düşürüldüğü bilinmektedir [47].

Lam ve arkadaşları mikrodalgada ısıtılmış piroliz yakıt ürünlerini işlenmemiş yağ ile karşılaştırdıklarında, atık yağın işlenmemiş yağdan daha düşük yoğunluklu fakat daha yüksek kalorifik bir değerde olduğunu söylemişlerdir. Piroliz yağlarının ( $757-773 \text{ kg} / \text{m}^3$ ) yoğunluğu, benzininkine oldukça yakındır. Piroliz yağları dizele göre ( $2-4 \text{ mm}^2/\text{s}$ ) biraz daha yüksek kinematik viskoziteye sahiptir ( $6-7 \text{ mm}^2/\text{s}$ ), ancak benzinden ( $0.7 \text{ mm}^2/\text{sn}$ ) oldukça yüksek olduğunu söylemişlerdir [48]. Genel olarak, işlem parametrelerinin piroliz yağlarının yakıt özellikleri üzerinde çok az etkisi olduğu görülmüştür, bu da ısıtılmış pirolizin yüksek hacimli atık yağı geri dönüşümünün uygun bir yolu haline getirebileceğini göstermektedir [49].

Atık lastik üç tip termal dönüşümle dönüştürülür; yanma, gazlaştırma ve piroliz. Bu işlemler arasındaki fark, yöntemlerin ve nihai ürünlerin durumu ile ilgilidir. Yanma işlemi, tüm bileşenler için sistem için ısı üretir. Gazlaştırma işlemi, kömür ve katranlardan hava, oksijen veya buhar ile yüksek sıcaklıkta yüksek verim ve esas olarak düşük moleküler ağırlıklı gaz üretmeyi amaçlamaktadır. Piroliz işlemi ise, atıkları faydalı ve iyileştirilmiş, daha değerli yakıt, kimyasallar ve diğer parçalara dönüştürmeyi amaçlar. Piroliz, oksijensiz bir durumda, yüksek sıcaklık vasıtasıyla bir tür termal ayrışma yöntemi işlemidir. Süreç, birçok paralel ve müteakip reaksiyonun toplamıdır [50].



Son on yılda, bazı yüksek kaliteli yakıtlar ve ürünler üretmek için süreç optimize edilebildiğinden, atık lastiklerin pirolizi yenilenmiştir. Atık lastiğin beş ürünü vardır: yağ, salınan gaz, kömür, artık çelik ürünleri ve diğerleri. Tüm bu ürünler tekrar kullanım potansiyeline sahiptir. Açığa çıkan gazın yeterli kalorifik değeri vardır [51-52].

Uçar ve arkadaşları kamyon lastikleri, sülfür miktarını azaltabilecek karbon siyahı destekli Co-Ni, Co-Mo ve Ni-Mo katalizörleri ile 350 °C'de 7 MPa hidrojen basıncı altında kükürt giderimini yaptıklarında en iyi azalmanın %0.77'den % 0.57'ye Ni-Mo ile yapıldığını gözlemlemişlerdir [53].

Doğan ve arkadaşları pirolitik lastik yağı, sülfür miktarını azaltmak için beş aşamada işlenmiştir: H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, aktif Bentonit-CaO, vakumla damıtma, oksidatif kükürt giderme ve yıkama kurutma. İlk önce yağ, 50 °C'de 4 saat boyunca ağırlıkça %8 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> ile karıştırılıp, daha sonra tortu çıkarılmıştır ve 70 °C'de 4 saat süreyle aktive edilmiş olup bentonit-CaO ilave etmişlerdir. Daha sonra yağ süzülüp ve vakumla damıtılmıştır. Daha sonra 60 °C'de 2 saat boyunca formik asit ve H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> ile işlendi. Son olarak yağı süzerek damıtılmış ve su ile yıkanmıştır ve 110 °C'de 30 dakika kurutulduktan sonra kükürt değerinin %1.13'ten %0.43'e düştüğünü gözlemlemişlerdir [4].

Chen ve arkadaşları yapmış oldukları deneyde ultrason metodu lastik yağındaki kükürdü gidermek için kullanmışlardır. Yağ, tetrakosilamonyum bromin, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> ve fosfotungstik asit ile karıştırılarak daha sonra 20 dakika boyunca 88 °C'de 20 kHz ultrason ile ışınlanarak oksitlemişlerdir. Yağ asetonitril ile ekstre edildikten sonra. %43.6 kükürt yağdan çıkarıldığı gözlemlenmiştir. Son olarak, yöntem tekrarlandığında alümina oksit emilimi ile %68.2 sülfür miktarını ortadan kaldırdığını gözlememişlerdir [54].

Jantaraksa ve arkadaşları yaptıkları çalışmada atıkları, yüksek miktarda sülfür bileşikleri (ağırlıkça %1.15) içeren yağa piroliz yoluyla yoğunlaştırmışlardır. Böylece, alümina üzerinde desteklenen molibden (Mo), nikel-Mo (NiMo) ve kobalt-Mo ile katalize edilen hidrodesülfürizasyon kükürtün giderilmesi için kullanmışlardır. Bunların içinde en yüksek kükürt giderimini (%87.8), 20 bar hidrojen basıncı altında

ağırlıkça % 2 NiMo / katalizör ile 250 °C sıcaklık altında 30 dakika reaksiyona bırakıldığında gerçekleşmiştir [55].

Unapumnuk ve arkadaşları atık lastik yakıtındaki kükürt miktarını azaltmak için yapmış oldukları deneyde ısıtma hızı ve son sıcaklık değerlerini karşılaştırmışlardır. Kükürt giderme sıcaklığı 400 °C'den 1000 °C'ye yükselterek azaltıldığını, bununla birlikte ısıtma hızı varyansının kükürt gidermede herhangi bir etki yaratmadığını gözlemlemişlerdir [56].

Bunthid ve arkadaşları atık lastikten üretilen nafta fraksiyonu, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> ve lastik kömürü ayrı ayrı ilave edilerek kükürttan arındırıldı ve maksimum kükürt giderme oranı sırasıyla %41.5 ve %47.6 olduğunu gözlemlemişlerdir. Her ikisi de (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> ve lastik kömürü) birlikte kullanıldığında, azalmanın %57.8 olduğunu gözlemlemişlerdir. Formik asit kullanılarak ayarlanmış pH değeri 4 olan sulu ortam da HNO<sub>3</sub> ile işlenmiş karakterde meydana gelen en yüksek kükürt giderme %75.2 olduğunu çalışmada tespit edilmiştir [57].

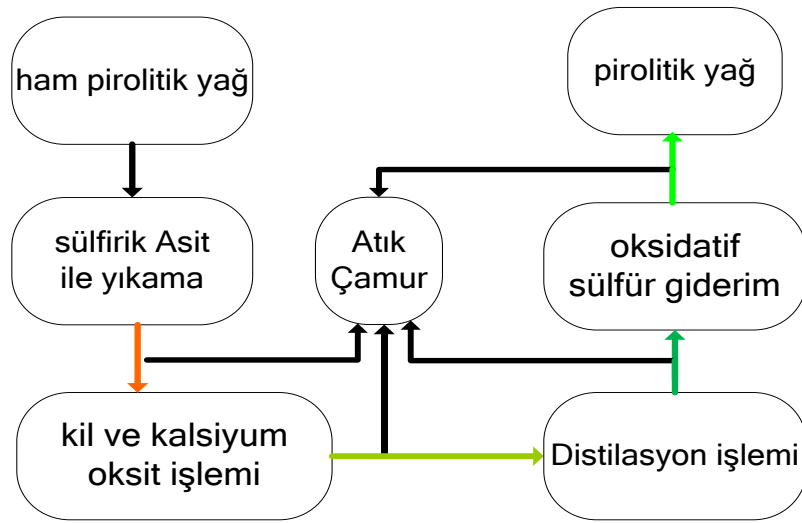
Al-lal ve arkadaşlarının yapmış oldukları deneyde 100 mL pirolitik yağ, 14 mL ağırlıkça %85 formik asit ve 6 mL ağırlıkça %50 hidrojen peroksiti yuvarlak tabanlı bir şişede karıştırmışlardır, daha sonra ultrason banyosuna bırakmışlardır. Belirtilen süre boyunca 78, 80, 90 °C' de yağlanmış 400 rpm'de karıştırılmış ve 1 saat boyunca süzölmeye bırakmışlardır. Lastik yağı, 70 °C'de 30 dakika süreyle 400 rpm'de karıştırıldıktan sonra ultrason ışınlanması ile reaksiyona sokulduğunda elde edilen kükürt giderme oranının sadece %53 olduğunu gözlemlemişlerdir [58].

## BÖLÜM 5

### DENEYSEL ÇALIŞMALAR

#### 5.1. DENEY YAKITININ HAZIRLANMASI

Bu çalışmada özellikleri iyileştirilmiş pirolitik yakıt ticari bir işletmeden temin edilmiştir. Kullanım ömrünü tamamlamış taşıt lastiklerinin, çelik telleri lastikten ayrıldıktan sonra, lastik küçük parçalara ayrılmıştır. Küçük parçalara ayrılan atık lastikten piroliz yöntemi ile piroliz yağı elde edilmiştir. Kullanılmış taşıt lastiklerinden elde edilen piroliz yağı direk motorda kullanım için uygun değildir. Lastik piroliz yağı özelliklerinin iyileştirilmesi için bazı yıkama, temizleme ve kimyasal prosesi içeren işlemlerden geçirilmesi gerekir. Bu çalışmada lastik piroliz yağı özelliklerinin iyileştirilmesi yapılan işlemler; asit ile yıkama işlemi, kil ve kalsiyum oksit işlemi, distilasyon işlemi ve oksidatif sülfür giderim işlemlerinden oluşmaktadır. Çalışmada kullanılan yakıt özelliklerinin iyileştirilmesi için Şekil 5.1’de verilen işlem basamakları takip edilmiştir.



Şekil 5.1. Yakıt özelliklerinin iyileştirilme basamakları.

Asit ile yıkama işleminde her 1000 gr ham pirolitik yakıt için 80 gr Sülfürik Asit yakıtın içerisine eklenmiştir. Pirolitik yakıt sülfürik asit karışımı bir ısıtıcı ile ısıtılmış sıcaklığı 50 °C'ye gelince sıcaklığı sabit tutulmuştur. Şekil 5.2'de ısıtıcı, karıştırıcı ünitenin üzerinde yakıtın ısıtıldığı görülebilir.



Şekil 5.2. Isıtıcı, karıştırıcı ünite.

Sabit sıcaklıkta yaklaşık 240 dakika bekleyen karışım mekanik bir karıştırıcı ile sürekli karıştırılmıştır. Daha sonra karışım 50 saat dinlenmeye bırakılmıştır. Dinlenen yakıt bir bez filtre ile filtrelenmiştir. Kil ve kalsiyum oksit işleminde her 950 gr pirolitik yakıtta 100 gr aktifleştirilmiş bentonit ve 50 gr kalsiyum oksit eklenerek karışım hazırlanmıştır. Karışım hazırlanırken hassas terazi kullanılmıştır. Hazırlanan Kil ve kalsiyum oksit karışımı yaklaşık 70 °C'de 240 dakika mekanik karıştırıcı ile karıştırılmıştır. Bu süre sonunda karışım 24 saat dinlenmeye alınmıştır. Elde edilen yakıt yine bir bez filtreden geçirilerek çamur kısmı arıtılmıştır. Kil ve kalsiyum oksit işleminden geçen yakıt bir distilasyon ünitesinde distilasyona tabi tutulmuştur. Distilasyon sonrası elde edilen yakıt, yakıt özellikleri bakımından dizel yakıtına benzer fakat içeriğinde sülfür miktarı yüksektir. Yakıtın sülfür miktarını düşürmek için oksidatif sülfür giderim işlemi gerçekleştirilmiştir. Oksidatif sülfür giderimi için her 950 gr pirolitik yakıtta 100 gr formik asit ve 200 gr hidrojen peroksit eklenerek karışım

hazırlanmıştır. Karışım 60 °C’de 120 dakika karıştırılmıştır. Sonrasında karışım 24 saat beklemeye alınmış sırası ile bez ve mazot filtresinden geçirilerek filtre edilmiştir. Saflaştırma işlemlerine tabi tutulan yakıt dizel motorda kullanılmaya hazırdır. Referans yakıt olarak kullanılan saf dizel yakıt ticari bir işletmeden alınmıştır. Referans dizel yakıtı ham pirolitik yakıt ve pirolitik yakıt özellikleri Çizelge 5.1’ de verilmiştir.

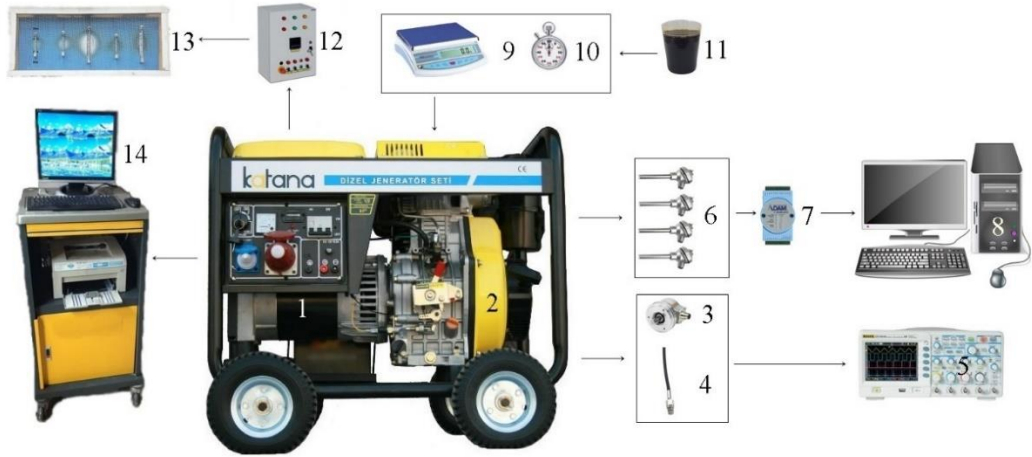
Çizelge 5.1. Yakıt özellikleri.

| Özellik                              | Saf Dizel | Ham Pirolitik yağ | Pirolitik yağ |
|--------------------------------------|-----------|-------------------|---------------|
| Yoğunluk (kg/m <sup>3</sup> ; 15 °C) | 835       | 939               | 899           |
| Setan numarası                       | 54.92     | -                 | <40           |
| Vizkosite, (cSt @40 °C)              | 2.929     | 5.042             | 2.153         |
| Alt ısıl değer (MJ/kg)               | 45.94     | 39.76             | 40.88         |
| Alevlenme noktası (°C)               | 60        | -                 | 60.3          |

## 5.2. MOTOR TESTİ DENEY DONANIMI

Testler dizel yakıt ve dizel-piroliz karışımları kullanılarak yapıldı. Çalışmada, üretilen piroliz yakıt ve saf dizel yakıt birbirleriyle hacimce %15 piroliz yakıt + %85 dizel yakıt, %30 piroliz yakıt + %70 dizel yakıt, %45 piroliz yakıt + %55 dizel yakıt oranları ile karıştırılmıştır. Çalışmada kullanılan yakıtlar sırasıyla P15D85, P30D70, P45D55 olarak adlandırılmıştır. Deney sonuçlarını karşılaştırmak için referans yakıt olarak saf dizel (D100) yakıtı kullanılmıştır. Yapılan deneysel çalışma tek silindirli, dört zamanlı, hava soğutmalı, doğal emişli bir dizel motor-jeneratör seti üzerinde gerçekleştirilmiştir. Deney verilerini almadan önce motorun kararlı hale gelene kadar çalıştırılmıştır.

Testler 3000 rpm sabit hızda ve 250 W aralıklarla 500-1250 W motor yüklerinde gerçekleştirilmiştir. Tüm testler boyunca motoru yüklemek için bir rezistans grubu kullanılmıştır. Deney sisteminin şeması Şekil 5.3’te ve deney sisteminin görünümü Şekil 5.4’te verilmiştir.



|    |               |    |                              |
|----|---------------|----|------------------------------|
| 1  | Alternatör    | 2  | Dizel motor                  |
| 3  | Encoder       | 4  | Silindir basınç sensörü      |
| 5  | Osiloskop     | 6  | İsılçift                     |
| 7  | Data kartı    | 8  | Bilgisayar                   |
| 9  | Hassas terazi | 10 | Kronometre                   |
| 11 | Test yakıtı   | 12 | Yükleme seti kontrol ünitesi |
| 13 | Yükleme Seti  | 14 | Egzoz Emisyon Cihazı         |

Şekil 5.3. Deney sisteminin şeması.



Şekil 5.4. Deney sisteminin görünümü.

### 5.2.1. Egzoz Gazı Analizörü

Deneyle sırasında egzoz emisyonlarının ölçülmesinde Şekil 5.5'te verilen BİLSA marka egzoz gaz analizörü kullanılmıştır. Deneylede kullanılan bu cihaz CO, C<sub>2</sub>O, HC, NO<sub>x</sub> emisyonlarını hassas bir şekilde ölçebilmektedir. Çizelge 5.2'de egzoz gaz analizörünün ölçüm aralıkları ve ölçüm hassasiyetleri verilmiştir. Deneyle yapılmadan önce egzoz gaz analizör cihazı yetkili firma tarafından kalibre ettirilmiştir. EK AÇIKLAMALAR A' da kalibrasyon sertifikası sunulmuştur.



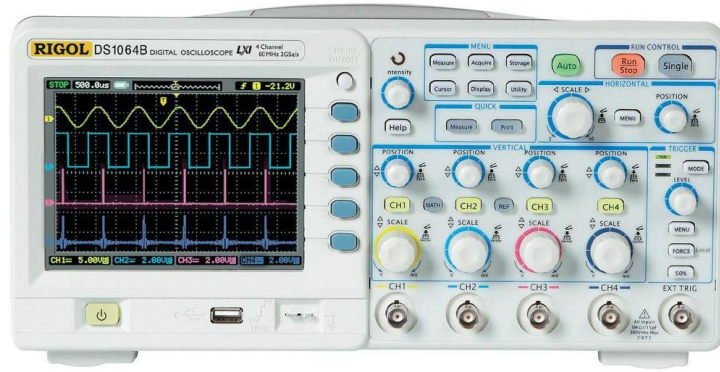
Şekil 5.5. Egzoz gaz analizörü.

Çizelge 5.2. Egzoz emisyon cihazı ölçüm aralıkları ve ölçüm hassasiyetleri.

| No. | Ölçüm Türleri                      | Ölçüm Aralığı | Doğruluk |
|-----|------------------------------------|---------------|----------|
| 1   | HC (ppm)                           | 0-20.000      | 1 %      |
| 2   | NO <sub>x</sub> (ppm)              | 0-5000        | 0.1 %    |
| 3   | CO konsantrasyonu (%)              | 0-10          | 0.01 %   |
| 4   | CO <sub>2</sub> konsantrasyonu (%) | 0-20          | 0.01 %   |

### 5.2.2. Osiloskop

Osiloskop, elektrik gerilimindeki zamana bağılı olan değişimleri tespitini sağlayan bir ölçüm cihazıdır. Osiloskop sensörlerden gelen gerilim değişimlerini gösterebilir veya kaydedebilir. Yapılan deneylerde silindir içi basınç ve krank açısı konumunu tespit eden sensörlerden gelen bilgilerin kaydedilmesinde osiloskop kullanılmıştır. Çalışmada RIGOL marka DS1064B model, dört kanallı dijital osiloskop kullanılmıştır. Şekil 5.6’da deney setinde kullanılan osiloskop verilmiştir.



Şekil 5.6. Osiloskop.

### 5.2.3. Deney Motoru

Test yakıtlarının yakılması ve analizlerinin gerçekleştirilmesinde KATANA marka KM178F model dizel-jeneratör seti kullanılmıştır. Şekil 5.7’de deneylerde kullanılan dizel jeneratör seti görülebilir. Deneylerde motor hızı 3000 d/d’da sabit tutulmuştur. Dizel motora akuple alternatöre bağlı yük setinde farklı yükler kullanılarak motorun farklı yüklerdeki çalışma koşulları incelenmiştir. Söz konusu dizel motor doğal emişli, hava soğutmalı, tek silindirli ve direkt enjeksiyonludur. Yapılan terslerde motor üzerinde herhangi bir modifikasyon gerçekleştirilmemiştir. Çizelge 5.3’de Dizel motor-jeneratör ünitesine ait özellikler verilmiştir.





Şekil 5.7. Dizel motor jeneratör seti.

Çizelge 5.3. Dizel motor-jeneratör seti teknik özellikleri.

| <b>Motor</b>                      |  |
|-----------------------------------|--|
| <b>Marka Model</b>                | <b>Katana KM178F</b>   |
| Genel özellikler                  | Dört zamanlı, hava soğutmalı, tek silindirli, direk enjeksiyonlu |
| Güç (kW @3000 rpm )               | 4  |
| ÇapxStrok (cm)                    | 7.8x6.2  |
| Biyel uzunluğu (cm)               | 10.1   |
| Silindir hacmi (cm <sup>3</sup> ) | 296  |
| Sıkıştırma oranı                  | 18:1   |
| Enjektör açılma basıncı (bar)     | 205  |
| Püskürtme Açısı (°KMA)            | 17   |
| <b>Alternatör</b>                 |  |
| <b>Marka Model</b>                | <b>Katana KD4500E</b>  |
| Maksimum güç (kVA)                | 2.4  |
| Güç (kVA)                         | 6.3  |
| Frekansı (Hz)                     | 50   |
| Çıkış voltajı (VAC)               | 230  |
| Faz sayısı                        | Tek fazlı  |

#### 5.2.4. Yükleme Seti

Motor üzerinde kullanılan farklı yakıtların farklı motor yüklerinde yanma karakteristiklerini incelemek için motora akuple alternatöre elektrik yükü bağlanmıştır. Bu elektrik yükü 250 W lık lambalardır. Motor yüklemesi 500, 750,1000 ve 1250 W olmak üzere 4 farklı yük kademesinde yapılmıştır. Yük kademelerinin değişimini anahtar ile açılıp kapanmasını sağlayan bir kontrol panosu üzerinden yapılmıştır. Şekil 5.8’de yükleme setinin fotoğrafı verilmiştir.



Şekil 5.8. Yükleme seti.

#### 5.2.5. Yakıt Tüketiminin Belirlenmesi

Pirolitik yakıtın hazırlanmasında ve motor testlerinde hassas terazi kullanılmıştır. Pirolitik yakıtın hazırlanmasında farklı kimyasalların belirlenen oranlarda kullanılmasında, motor testlerinde ise zamana bağlı yakıt tüketiminin belirlenmesinde kullanılmıştır. Bir kronometre yardımı ile zamana bağlı anlık yakıt tüketimi kaydedilerek yakıt tüketim değerleri belirlenmiştir. Deneylerde kullanılan elektronik hassas terazi 1 g hassasiyetinde tartım yapabilmektedir. Yakıt tüketiminin belirlenmesinde kullanılan elektronik hassas terazi Şekil 5.9’da verilmiştir.



Şekil 5.9. Yakıt tüketiminin ölçülmesi.

### 5.2.6. Data Logger

Çalışmada sıcaklık verilerinin toplanması, bilgisayara iletilmesi için ADAM-4019+ modül kullanılmıştır. ADAM modülü sensör bilgisayar arasında bağlantı ara yüzü birimidir. 8 kanallı, T/C, mV, V, mA girişlerine sahip modülün teknik özellikleri Çizelge 5.4'te, fotoğrafı Şekil 5.10'da verilmiştir.

Çizelge 5.4. Data logger teknik özellikleri.

|                                |  |
|--------------------------------|--|
| Marka Model                    | ADAM-4019+   |
| Çözünürlük (bit)               | 16   |
| Örnekleme oranı (örnek/saniye) | 10   |
| Çalışma Sıcaklığı (°C)         | -25 ~ 85   |
| Kanal sayısı                   | 8  |
| Giriş türü                     | T/C, mV, V, mA                                       |
| Giriş aralığı                  | ±1V, ±2.5V, ±5V, ±10V, ±100mV, ±500mV, ±20mA, 4 20mA |



Şekil 5.10. Data logger.

### 5.2.7. Güç Kaynağı

Farklı sensörler ve elektrik alıcıları farklı amper ve voltaj değerleri ile çalışmaktadır. Farklı sensörlerin giriş voltajlarını sağlamak için güç kaynakları kullanılmıştır. Data logger, encoder ve silindirik içi basınç sensörü güç kaynakları ile beslenmiştir. Şekil 5.11’de kullanılan güç kaynağının fotoğrafı verilmiştir.



Şekil 5.11. Güç kaynağı.

### 5.2.8. Isıl Çift

Motor testlerinde egzoz gazlarının sıcaklığı ve ortam sıcaklığının ölçülmesi yanma ve emisyon parametreleri hakkında yorum yapabilmek için önem arz etmektedir. Çalışmada egzoz emisyonlarının sıcaklıklarının ölçülmesi için egzoz manifold çıkışına, ortam sıcaklığının ölçümü için test motorunun yanına, emme havası giriş sıcaklığı için emme giriş portunun ön kısmına ve motor yüzey sıcaklığı için motor yüzeyine K tipi bir ısı çifti yerleştirilmiştir. Kullanılan ısı çifti  $\pm 0,1$  °C hassasiyete sahip olup ısı çifti ait görsel Şekil 5.12’de görülebilir.



Şekil 5.12. Isıl çifti.

### 5.2.9. Krank Açısının ve Silindir İçi Basıncın Ölçülmesi

Motorla kullanılan yakıtın oluşturduğu silindir içi basıncının pistonun konumuna göre belirlenmesinde basınç sensörü ve açı sensörü kullanılmıştır. Silindir içi basınç sensörü silindir kapağına monte edilmiştir. Açı sensörü krank miline bağlıdır ve krank miline bağlı açı sensörü ile pistonun konumu tespit edilebilir. Çizelge 5.5’te krank açısı ve silindir içi basıncın ölçümünde kullanılan sensörlerin ölçüm aralıkları verilmiştir. Şekil 5.13’te basınç ve açı sensörlerine ait fotoğraflar verilmiştir.

Çalışmada krank açısı ve silindir içi basıncın ölçümlerinden elde edilen veriler osiloskopta görüntülenmiş ve cihaz hafızasına kaydedilmiştir.

Çizelge 5.5. Krank açısı ve silindir içi basınç ölçümünde kullanılan sensörlerin ölçüm aralıkları.

| No. | Ölçüm Türleri                        | Ölçüm Aralığı | Doğruluk         |
|-----|--------------------------------------|---------------|------------------|
| 1   | Basınç (Optrand Auto PSI-TC) (psi)   | 0-3000        | $\pm 1$ %        |
| 2   | Krank açısı (Encoder) ( $^{\circ}$ ) | 0-360         | $0.1^{\circ}$ CA |



Şekil 5.13. Basınç ve krank açısı sensörlerine ait fotoğraflar.

### 5.3. DENEY VERİLERİ İLE HESAPLANAN PERFORMANS DEĞERLERİ

Dizel motor-jeneratör setinde, sistem üzerine yerleştirilen sensörlerden alınan veriler motor performansını, emisyon değerlerini ve yanma kriterlerini analiz edebilmek amacıyla kullanılmıştır.

#### 5.3.1. Motor Hacminin Anlık Değişimi

Motor hacminin anlık değişimi direkt olarak ölçülemez ancak deney motoruna ait geometrik özelliklerin bilinmesi ile ve krank miline takılan bir enkoderden alınan veriler ile hesaplanabilir [59]. Krank mili açısına bağlı piston konumu Eşitlik (5.1) kullanılarak hesap edilebilir.

$$V = V_y + A_p r \left[ (1 - \cos \theta) + \frac{1}{\lambda} - \sqrt{\frac{1}{\lambda^2} - \sin^2 \theta} \right] \quad (5.1)$$

Burada;

$V_y$  Yanma odası hacmi

$A_p$  Piston Tepesi Alanı

$r$  Krank yarı çapı

$\theta$  Krank açısı

$\lambda$  Krank yarı çapının biyel kolu uzunluğuna oranı

#### 5.3.2. Silindir Basıncının Analizi

Teorik olarak dizel motorlarda kısılmaz emisyon koşulları gerçekleştiğinden yanma odasına alınan dolgu miktarı belirli bir devir için hep aynıdır. Ancak gerçek motor çalışması koşullarında içeri alınan dolgu miktarındaki küçük değişimler ve silindir içindeki yerel koşulların değişimi silindir içi basınçlarında değişime sebep olur. Silindir basıncındaki çevrimden çevrime değişen bu farklılıkları en aza indirmek için 500 çevrimin ortalaması alınarak tek çevrim şeklinde ifade edilmiştir. Silindir içi basınç sensöründen alınan veriler direk kullanılamaz, çıkış sinyali mV cinsinden olup Eşitlik (5.2) denklem kullanılarak silindir içi basınç verileri oluşturulmuştur.

$$P = K.\theta \left[ 1/14.5 \right] \quad (5.2)$$

Burada;

P Basınç (bar)

K Silindir basıncı ile sinyal çıkış voltajı arasındaki oranı belirleyen katsayı

$\theta$  Herhangi bir krank açısı için çıkış sinyalidir

### 5.3.3. Isı Açığa Çıkış Oranının Hesaplanması

İçten yanmalı motorlara ait ISO, termodinamiğin birinci kanunu kullanan bir yanma analiz metodudur ve yanma sürecinde yakıttaki kimyasal enerjinin açığa çıkış hızını gösterir. Dizel motordaki yanmanın anlaşılması ve bu çalışmada kullanılan yakıtların yanma özelliklerinin karşılaştırılması için tek boyutlu basitleştirilmiş bir yanma modeli kullanılmıştır. Tek boyutlu yanma modelinde, yanma odasındaki hava ve yakıt karışımından oluşan dolgu ideal gaz olarak kabul edilmiştir ve emme supabının kapanmasından egzoz supabının açılmasına kadarki süreçte yanma odasındaki dolgunun miktarında ve kompozisyonunda bir değişim oluşmamıştır. Yanma odasındaki yakıtın yanması ile açığa çıkan enerji aynı zamanda silindire sürülen enerji olarak kabul edilmiştir. İçten yanmalı motorlarda yanma termodinamiğin birinci kanunu ile tanımlanabilir ve enerji dönüşüm eşitliği Eşitlik (5.3) gibi yazılır ise [49];

$$\frac{du}{d\theta} = Q_n - W \quad (5.3)$$

$$mC \frac{dT}{d\theta} = Q_n - P \frac{dv}{d\theta} \quad (5.4)$$

$du$ = Sistem içerisindeki kütlenin iç enerji değişimi

$Q_n$ = Yanma odasında ortaya çıkan net ısı (ISO)

$W$ = Sistem sınırı tarafından yapılan iş

Günümüz motorlarında sistemdeki kütle ve ısı transferinin ISO üzerindeki etkisi çok küçük olduğu için genellikle ihmal edilir [60]. Bu yüzden  $Q_n$  hesaplanırken, yanma odasından silindir cidarlarına ve soğutma suyuna olan ısı transferi dahil edilmemiştir.



Bu noktada ideal gaz kabulü yapılarak;

$$PV = mRT \quad (5.5)$$

Eşitlik (5.13) için kütleinin sabit kaldığı kabulü ile türev alınırsa;

$$\frac{dT}{d\theta} = \frac{1}{mR} \left[ P \frac{dV}{d\theta} + V \frac{dP}{d\theta} \right] \quad (5.6)$$

Eşitlik (5.14) ve eşitlik (5.12) kullanılarak düzenlendiğinde;

$$Q_n = \left[ \frac{C_v}{R} + 1 \right] P \frac{dV}{d\theta} + \frac{C_v}{R} V \frac{dP}{d\theta} \quad (5.7)$$

İfadesi elde edilir.  $\frac{C_v}{R}$ , (k) özgül ısı oranı cinsinden eşitlik (5.16)'de gösterildiği gibi ifade edilebilir.

$$\frac{C_v}{R} = \frac{1}{k-1} \quad (5.8)$$

Eşitlik (5.16), eşitlik (5.15)'de yerine yazılarak ISO'nun anlık değişimi bulunur (Eşitlik 5.17)

$$Q_n = \left[ \frac{k}{k-1} P \frac{dV}{d\theta} + \frac{1}{k-1} V \frac{dP}{d\theta} \right] \quad (5.9)$$

#### 5.3.4. Isı Açığa Çıkış Oranının Filtrelenmesi

Özellikle ISO grafiğinde oluşan salınımları azaltmak için filtre işlemine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu çalışmada, ısı açığa çıkış oran grafiklerindeki salınımları azaltmak için Eşitlik (5.10)'da ifade edilen düşük gürültülü süper Lanczos algoritması kullanılmıştır [4, 61-63].

$$dP = 86(P_{8+4} - P_{8-4}) + 142(P_{8+3} - P_{8-3}) + 193(P_{8+2} - P_{8-2}) + 126(P_{8+1} - P_{8-1})/1188d\theta \quad (5.10)$$

P Silindir basıncı

$\theta$  Krank Mili Açısı

### 5.3.5. Efektif Verim

Krank milinden alınan gücün, silindire yakıt ile verilen enerjisine oranına efektif verim denir. Çalışmada efektif verim için eşitlik (5.11) kullanılmıştır.

$$\eta_e = \frac{P_e \cdot 3600}{B_e \cdot LHV} \quad (5.11)$$

Burada;

|              |                      |
|--------------|----------------------|
| $\eta_e$     | Efektif verim        |
| $P_e$ (kW)   | Efektif güç          |
| $B_e$ (kg/h) | Yakıt tüketimi       |
| LHV (kJ/kg)  | Yakıt alt ısı değeri |

### 5.3.6. Özgül Yakıt Tüketimi

Özgül yakıt tüketimi bir motorun bir saatte bir kW güç üretmek için tükettiği yakıt miktarı şeklinde tanımlanabilir. Motora sağlanan yakıtın ne derece verimli kullanıldığını gösteren bir değerdir. Yapılan çalışmada özgül yakıt tüketimi Eşitlik (5.12)'de verilen formül ile hesap edilmiştir.

$$b_e = \frac{B_e \cdot 1000}{P_e} \quad (5.12)$$

Burada;

|               |                      |
|---------------|----------------------|
| $b_e$ (g/kWh) | Özgül yakıt tüketimi |
| $P_e$ (kW)    | Efektif güç          |
| $B_e$ (kg/h)  | Yakıt tüketimi       |

## BÖLÜM 6

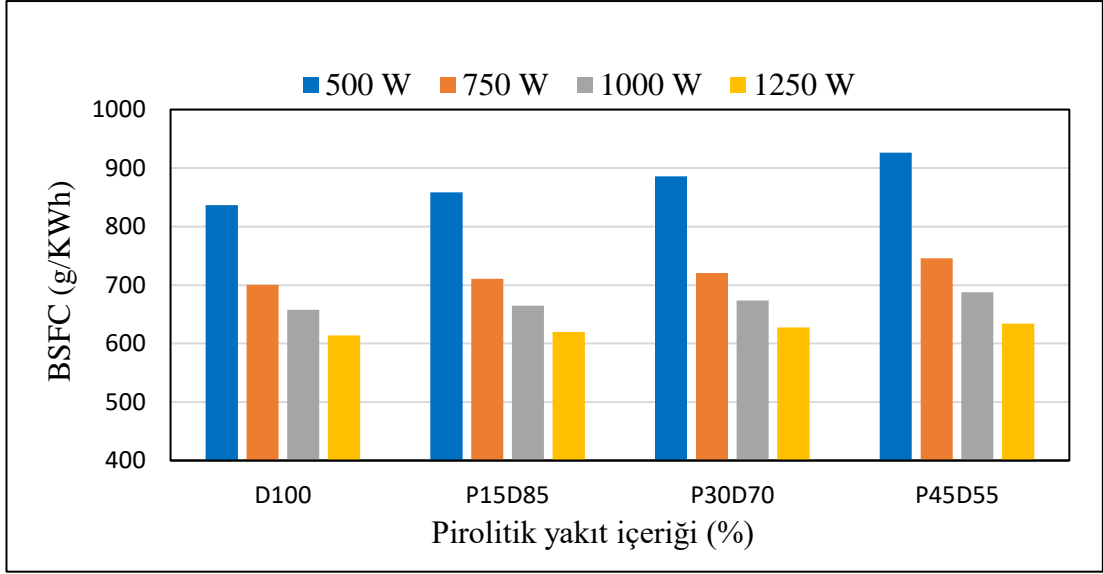
### DENEYSEL BULGULAR

#### 6.1. Motor Testleri

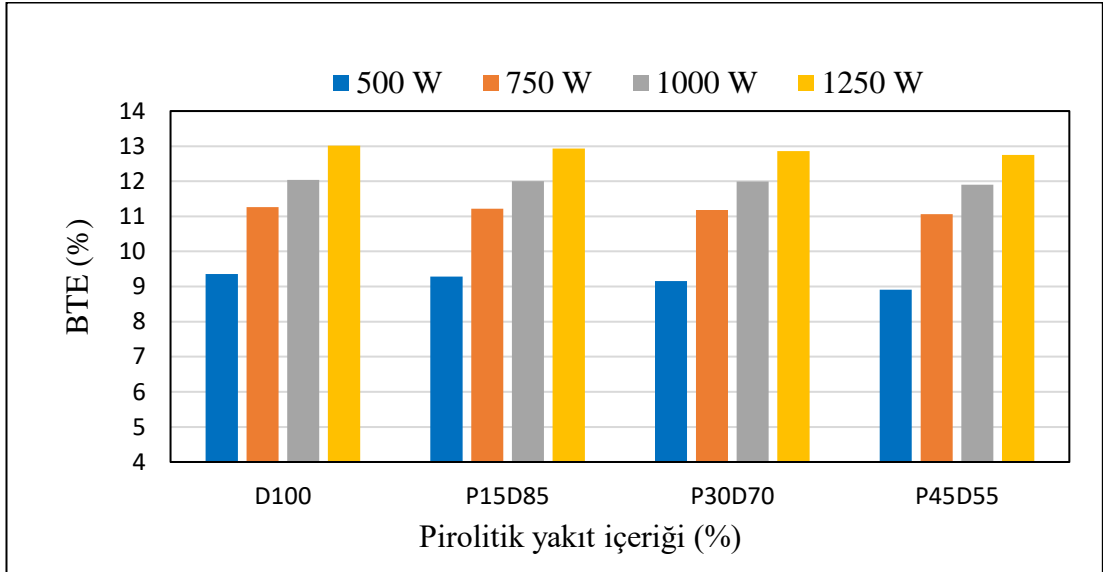
Bu tez çalışmasında bir dizel motorda test yakıtları ve motor yükünün değişimine bağlı yanma karakteristikleri, motor performansı ve egzoz emisyonları incelenmiştir.

#### 6.2. Performans Karakteristikleri

Bu tez çalışmasında motor performansını değerlendirmek için BSFC ve BTE seçilmiştir. Şekil 6.1. ve Şekil 6.2.'de sırasıyla test yakıtı ve yüke bağlı olarak BSFC ve BTE'nin değişimleri göstermektedir. Test yakıtlarının ısıtma değerleri hem BSFC'yi hem de BTE'yi doğrudan etkiler. Şekil 6.1'de görüldüğü gibi, dizel yakıtın alt ısıl değeri LPY yakıtından daha yüksektir. D100 yakıtında LHV değerinin yüksek olması, D100 için en düşük BSFC değerlerinin elde edilmesini sağlamıştır. Buna paralel olarak, karışımlardaki LPY içeriğinin artmasıyla BSFC değerleri adım adım yükselmiştir. Başka bir deyişle, en yüksek BSFC değeri P45D55 yakıt tipinde hesaplanmıştır. BSFC'nin karışımlara LPY yakıtının artmasıyla artmasının nedeni, aynı güç çıkışına ulaşmak için daha fazla yakıt enjekte edilmesi gerektiğidir. Ayrıca, test motorundan elde edilen güç, motor yükünün artışına bağlı olarak artmıştır. Bu nedenle motor yüklerindeki artışla BSFC değeri azalmıştır. Tüm test yakıtları için aynı durum gözlenmiştir. Öte yandan, BSFC ve BTE için ters orantı elde edilmiştir. Başka bir deyişle, BTE arttığında, BSFC azalmıştır (bakınız Şekil 6.1. ve Şekil 6.2.), çünkü BTE değerinin hesaplanmasında, BSFC değerlerinden ve test yakıtlarının alt ısıl değerinden faydalanılmıştır. En yüksek BTE değeri D100 için elde edilmiştir. Çünkü tüm test yakıtları arasında en düşük BSFC ve en yüksek yakıt alt ısıl değerine sahiptir. D100 yakıtından sonra BTE değeri büyükten küçüğe P15D85, P30D70 ve P45D55 şeklinde sıralanır. Benzer sonuçlar literatürde önceki çalışmalarda da bildirilmiştir [60,64]



Şekil 6.1. Test yakıtı ve yüke bağlı olarak BSFC' nin değişimi.



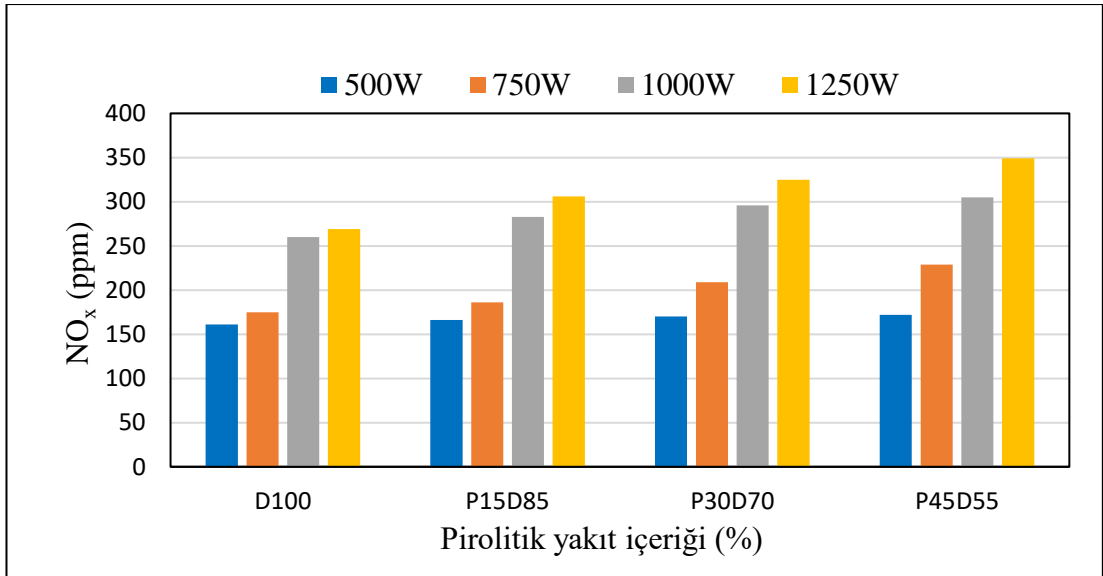
Şekil 6.2. Test yakıtı ve yüke bağlı olarak BTE' nin değişimi.

### 6.3. Emisyon karakteristikleri

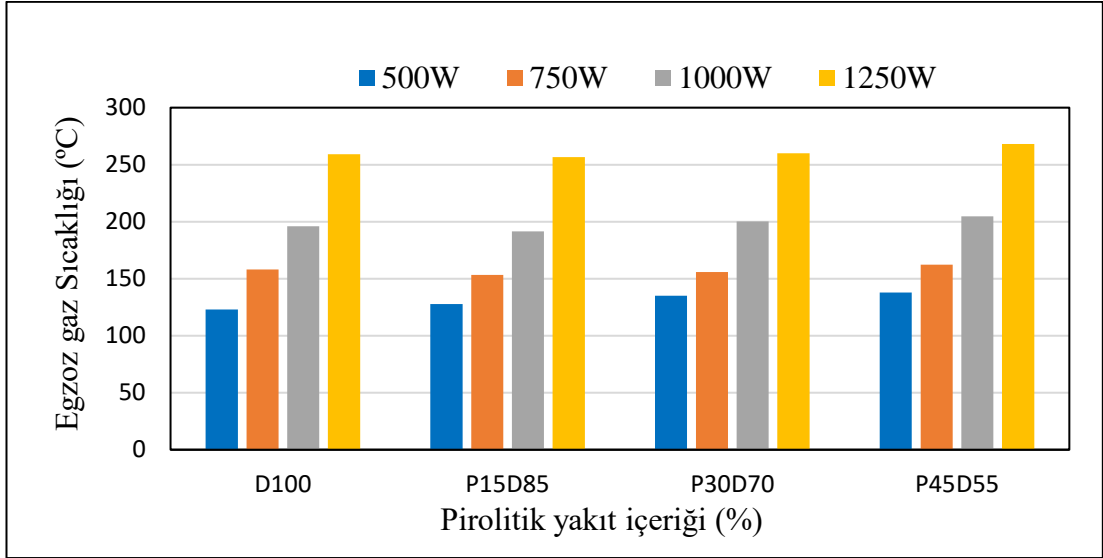
#### 6.3.1. NO<sub>x</sub> Emisyonu ve Egzoz Sıcaklığı

Test yakıtları için motor yüküne bağlı azot oksitlerin (NO<sub>x</sub>) değişimi şekilde verilmiştir. Yanma teorisinde dizel motorlar için NO<sub>x</sub> üretim mekanizmaları arasında

yüksek sıcaklık ve yüksek oksijen kullanılabilirliğinden dolayı üretilen NO<sub>x</sub>'in çoğunluğunu termal mekanizma oluşturur [65]. Şekil 6.3 'te görüleceği üzere test yakıtında pirolitik yakıt içeriğinin artışına bağlı olarak NO<sub>x</sub> emisyonları artmıştır. Test yakıtında pirolitik yakıt içeriğinin artışına bağlı olarak artan tutuşma gecikmesi silindir içi sıcaklığını artmasıyla sonuçlanmıştır. Silindir içi sıcaklığın artması NO<sub>x</sub> emisyonlarını artırır [65]. Diğer bir NO<sub>x</sub> üretim mekanizması ise yakıt kaynaklı NO<sub>x</sub> üretim mekanizmasıdır [49]. Test yakıtında bulunan yüksek azot ihtivası NO<sub>x</sub> emisyonunu artırabilir. Ayrıca pirolitik yakıt içeriğinin artışı test yakıtının yoğunluğunu ve aromatik içeriğini arttırdığından NO<sub>x</sub> emisyonları artar [4]. Şekil 6.4'te Test yakıtı ve yüke bağlı olarak egzoz gaz sıcaklığının değişimleri göstermektedir. Egzoz gaz sıcaklıklarının test yakıtındaki pirolitik yakıt içeriğine ve yüke bağlı olarak artmıştır. Bu artış silindir içi basınç artışına paraleldir. Silindir içeriğindeki basınç artışının nedenleri 6.1.2 Yanma Karakterleri başlığı altında açıklanmıştır.



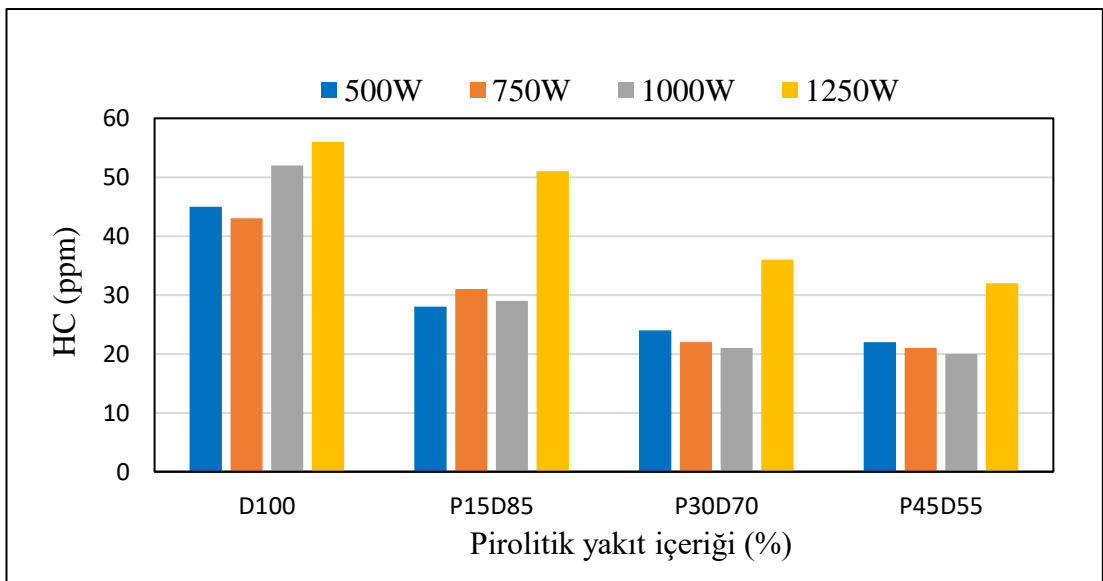
Şekil 6.3. Test yakıtı ve yüke bağlı olarak NO<sub>x</sub> emisyonunun değişimi



Şekil 6.4. Test yakıtı ve yüke bağlı olarak egzoz gaz sıcaklığının değişimi.

### 6.3.2. HC Emisyonu

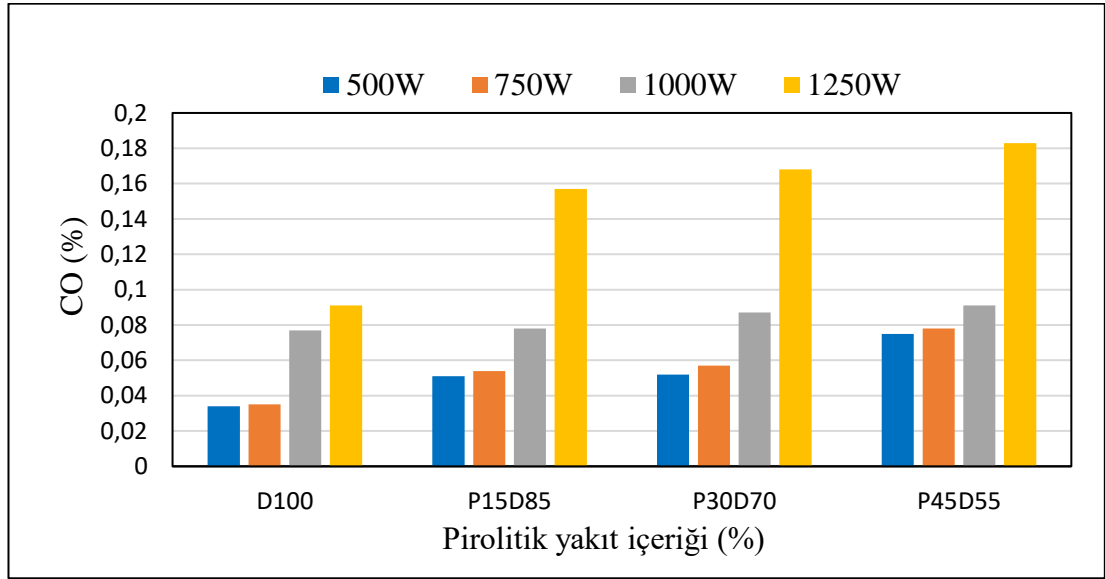
Test yakıtları için motor yüküne bağlı HC emisyonlarının değişimi Şekil 6.5'te verilmiştir. Dizel yakıtına pirolitik yakıt eklenmesi HC emisyonları tüm yük durumlarında iyileştirmiştir. Dizel yakıtına pirolitik yakıt eklenmesi test yakıtının viskozitesini ve uçuculuğunu iyileştirmiştir. Bu durum hava ile yakıtın iyi karışmasını ve dolayısı ile HC emisyonlarının azalmasını sağlar [4].



Şekil 6.5. Test yakıtı ve yüke bağlı olarak HC emisyonunun değişimi.

### 6.3.3. CO Emisyonu

Hidrokarbon yakıtlarının yanma odasında yetersiz oksidant ve düşük sıcaklığın etkisi ile eksik yanması sonucu CO emisyonları oluşur. Sıkıştırma ile ateşlemeli motorlar yüksek yanma sıcaklığı ve hava fazlalığı ile çalıştığından CO emisyonları oldukça düşüktür [23,66]. Şekil 6.6’da test yakıtlarının yüke bağlı CO emisyonlarının değişim grafiği verilmiştir. Test yakıtlarının karbon ve oksijen içeriklerinin birbirine çok yakın olması sebebiyle CO emisyon değerleri genellikle birbirine yakın değerdedir. Pirolitik yakıtının yüksek uçuculuğu yanma odasındaki soğutma etkisiyle yanma odasındaki sıcaklıkları düşürerek CO emisyonlarının oluşumunu artırmaktadır [4]. CO emisyonları motor yük artışına paralel olarak artmıştır. Yük artışına paralel olarak CO emisyonlarının artışı artan yakıt yoğunluğu ve tüketimi ile ilişkilendirilebilir.

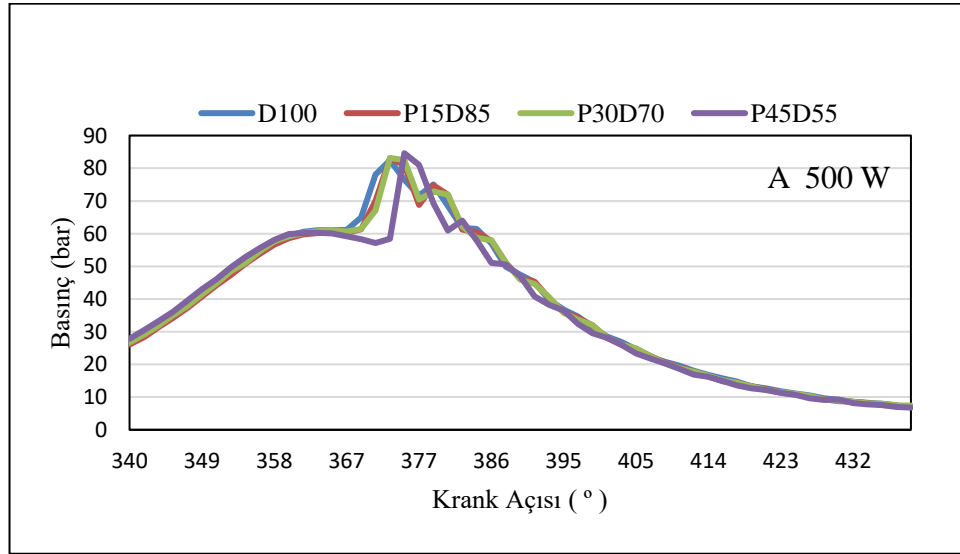


Şekil 6.6. Test yakıtı ve yüke bağlı olarak CO emisyonunun değişimi.

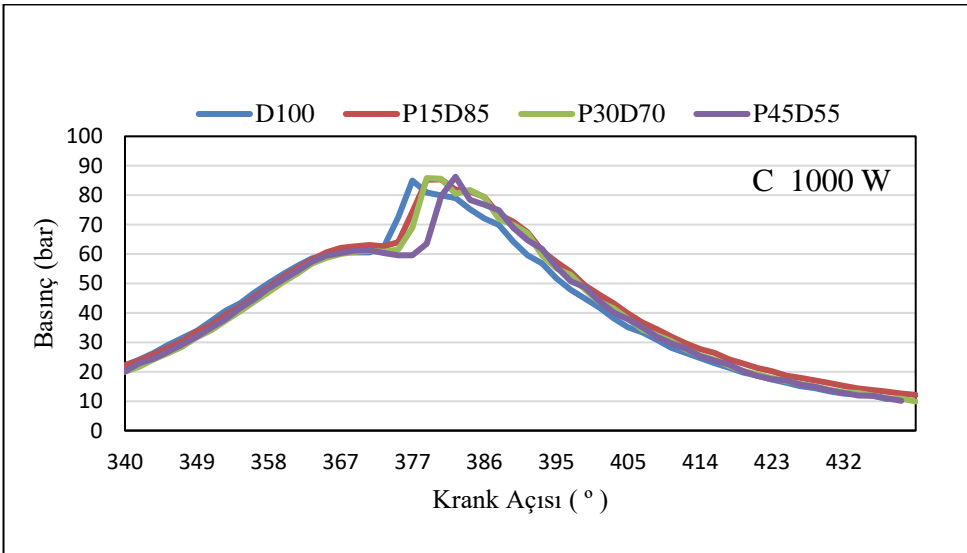
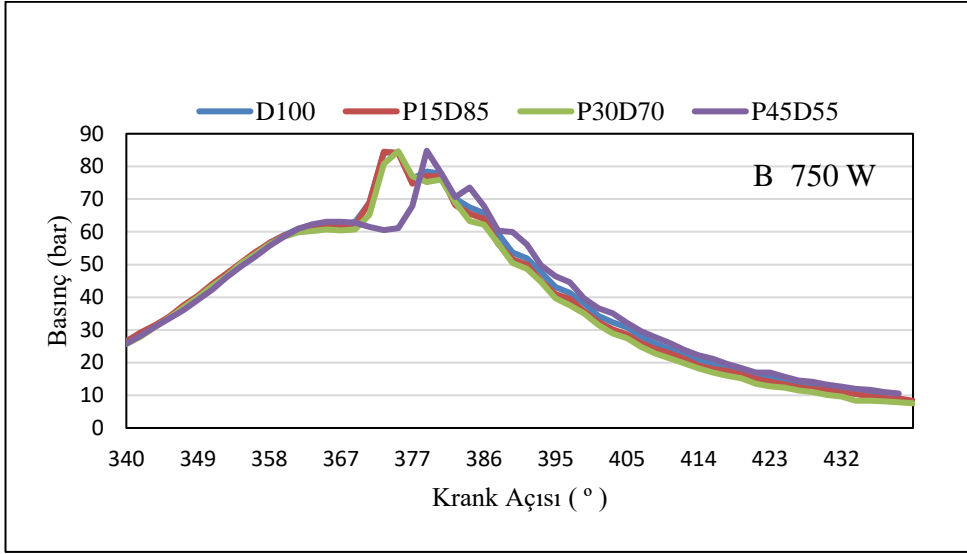
### 6.4. Yanma Karakteristikleri

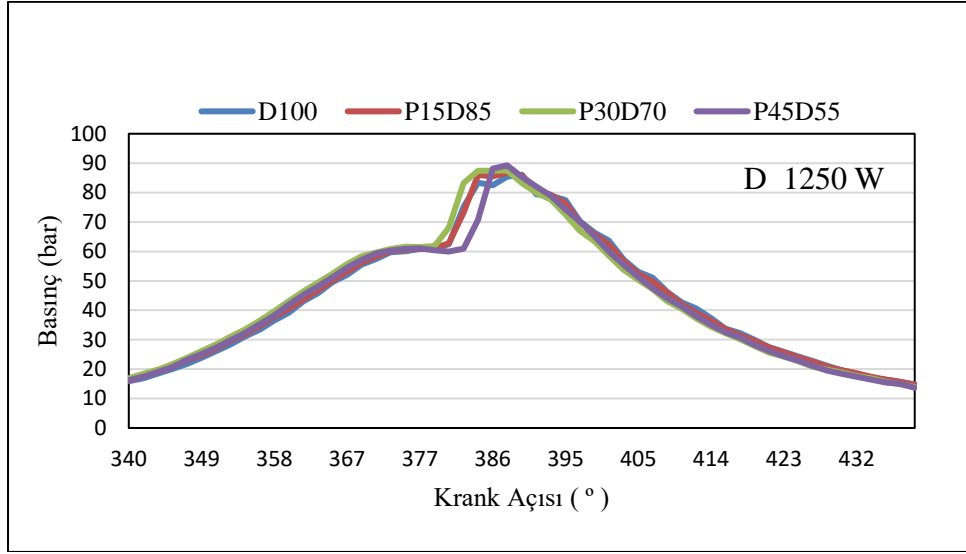
Silindir içerisinde gerçekleşen yanma sürecini anlamak için silindir içerisinde gerçekleşen basınç değişimlerinin ölçülmesi ve değerlendirilmesi büyük önem taşır. İçten yanmalı motorlarda güç çıkışının alınabilmesi için silindir içerisinde yakılan kimyasalın oluşturduğu basınçtan istifade edilir. Bu nedenle silindir içi yanma sonu basıncının yüksek olması arzu edilen bir durumdur. Bunun yanı sıra değişken ve aşırı

fazla yanma sonu basıncı motorda hasara neden olabilmektedir. Silindir içerisindeki yanma sonu basınçlarının bilinmesi, kullanılan yakıtların motorda oluşturacağı olumlu ya da olumsuz etkileri hakkında bilgi verir (Şekil 6.7). A, B, C ve D’de sırası ile 500W, 750W, 1000W ve 1250W motor yükleri için dizel yakıtı içerisindeki pirolitik yakıt içeriğine bağlı olarak silindir içi basınç değişimi verilmiştir. Yük artışına bağlı olarak tüm yakıtların silindir içi basınçlarında artış olmuştur. Düşük pirolitik yakıt içeriğinde silindir içi maksimum basınçlar ihmal edilebilir düzeyde olmakla birlikte, genel olarak dizel yakıtına eklenen pirolitik yakıt içeriğinin arttırılmasına bağlı silindir içi basınç değerlerinde artış gözlemlenmiştir. Maksimum silindir içi basınç değerleri tüm yükler için P45D55 test yakıtıyla 1250 W motor yükünde sağlanmıştır. P45D55 yakıtı ile 1250 W motor yükünde dizel yakıtı ile elde edilen silindir içi basınç değerinden %4.64 daha fazla silindir içi basınç değeri elde edilmiştir.



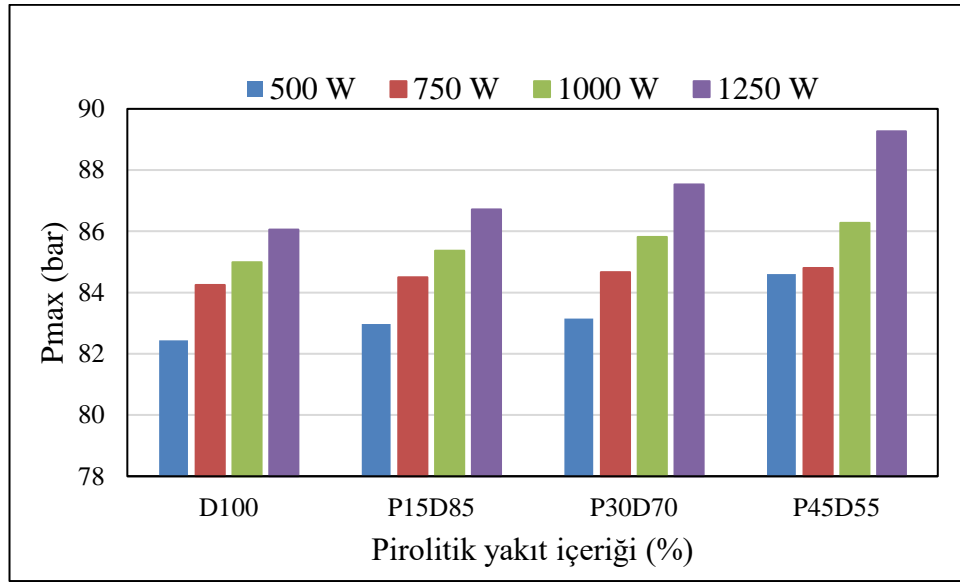






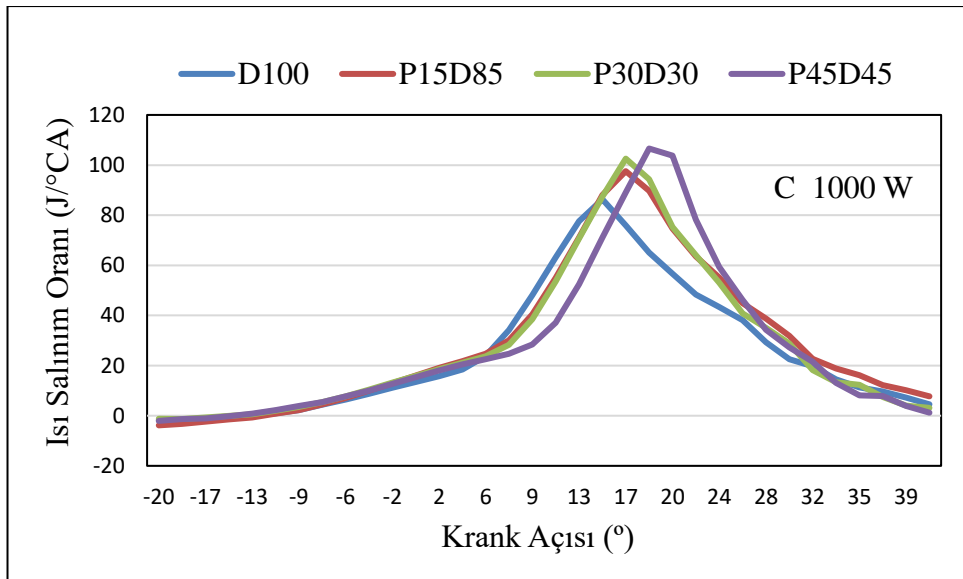
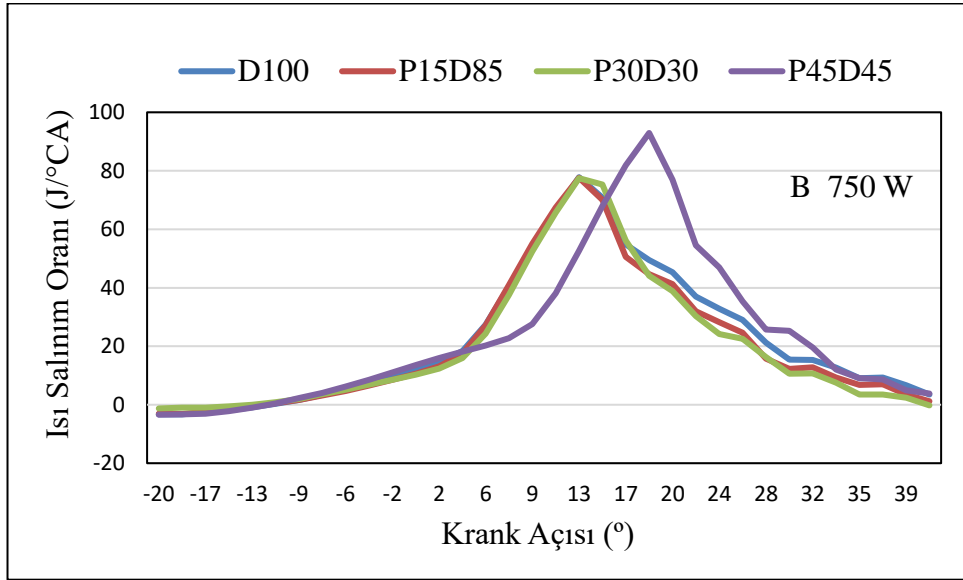
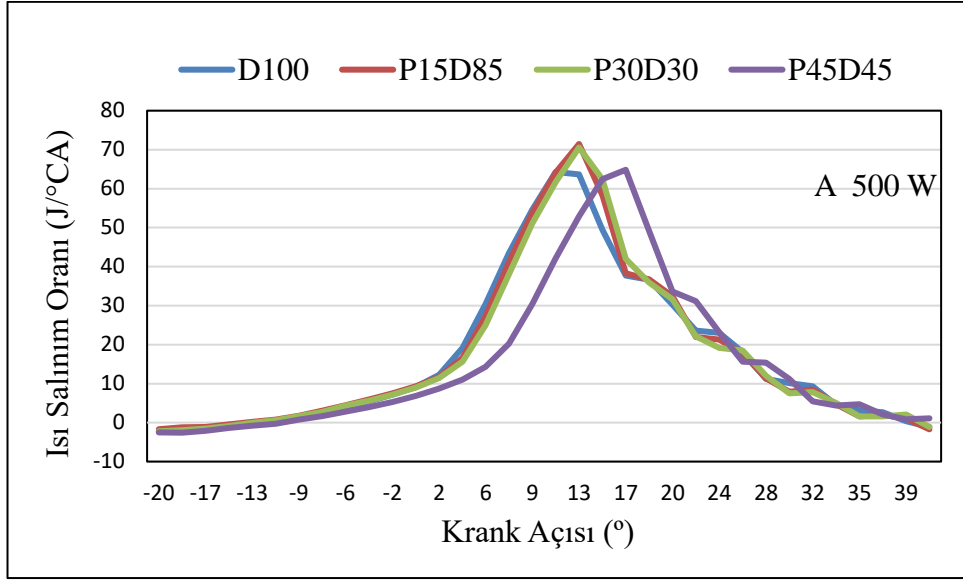
Şekil 6.7. Test yakıtı ve yüke bağlı olarak silindir içi basınç değişimi A) 500 W, B) 750 W, C) 1000 W, D) 1250 W motor yükü için).

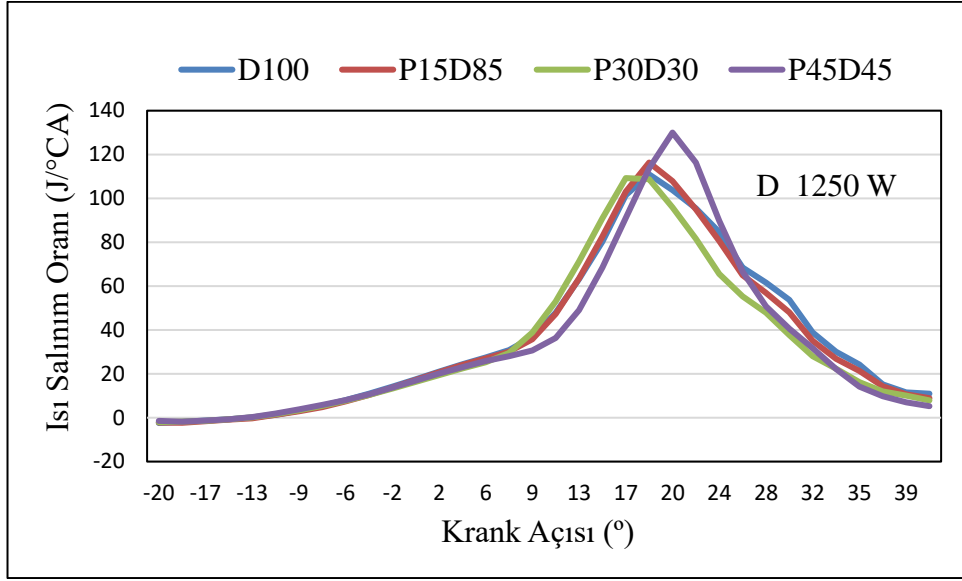
P45D55 yakıtı için tüm yük değerleri için silindir içi basınç oluşumu gecikmiştir. Uçuculuk oranı yüksek yakıtlarda tutuşma gecikmesinin artışı, ani yanma periyodundaki yanacak yakıtın artışına sebep olur ve bu durum  $P_{max}$ ' ı artırır [67]. Ayrıca pirolitik yakıtın düşük viskozitesi yakıtın atomizasyonunu iyileştirdiğinden düşük motor yükü haricindeki yük değerlerinde silindir içi basınç değerini arttırmıştır [65]. Şekil 6.8.'de Test yakıtı ve yüke bağlı maksimum silindir basınç değerlerinin değişimi verilmiştir.



Şekil 6.8. Test yakıtı ve yüke bağlı olarak maksimum silindir basınç değişimi.

Şekil 6.9'da Test yakıtı ve yüke bağlı olarak ısı salınım oranları verilmiştir. Karışım içerisindeki pirolitik yakıt içeriğinin artması daha uzun ateşleme gecikmesine ve dolayısı ile daha kısa süren yanma periyoduna sebep olduğu net bir şekilde görülebilir. Test yakıt içeriğindeki pirolitik yakıt yüzdesinin artmasına bağlı olarak artan tutuşma gecikmesi, pirolitik yakıtın yüksek uçuculuğu karakteristiği ve düşük setan sayısı ile ifade edilebilir [68-69]. Çizelge 5.1'de pirolitik yakıt setan sayısının dizel yakıt setan sayısına oranla neredeyse %28 oranda daha düşük olduğu görülebilir. Tutuşma gecikmesinin artışı yakıtın karışma süresini artırır, yakıt atomizasyonunu ve yakıt hava karışımının iyileşmesini sağlar. Pirolitik yakıtın düşük viskozitesi atomizasyonu iyileştirir [14]. Düşük pirolitik yakıt içeriğinde ısı salınım hızı dizel yakıtının ısı salınım hızı ile benzerdir. Bunun nedeni muhtemelen dizel yakıtının karışım içeriğinde baskın olması ve yanma prosesini dizel yakıtının başlatmasıdır [65]. Pirolitik yakıt içeriğinin artmasına bağlı olarak tutuşma gecikmesi önemli ölçüde artar ve ısı salınım hızının artmasına neden olur. Pirolitik yakıtın yüksek aromatik içeriği nedeniyle yüksek adyabatik alev sıcaklığına sahiptir, bu da yakıtta daha yüksek ısı salınım hızı sağlar [12]. Ayrıca ısı salınım hızının artmasına yakıtın atomizasyonundaki artış ve yakıt içerisindeki oksijen oranının artışı katkı sağlar [36,65].





Şekil 6.9. Test yakıtı ve yüke bağlı olarak ısı salınım oranları değişimi A) 500 W, B) 750 W, C) 1000 W, D) 1250 W motor yükü için).

## BÖLÜM 7

### SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışma iki önemli amaca hizmet etmektedir. Çalışmanın ilk amacı çevre kirliliğinin bir nebze olsun azaltılmasıdır ki, çalışmada atık lastiklerin değerlendirme yöntemlerinden biri olan piroliz kullanılmıştır. Böylece doğada yüzyıllarca kendiliğinden kaybolmayan, çevre kirliliği, görüntü kirliliği ve depolama sıkıntısı oluşturan atık lastiklerin geri kazanılması sağlanmıştır. Çalışmanın ikinci aşamasında fosil kökenli yakıtlara olan bağlılığı geri dönüşüm ile bir miktarda olsa azaltmak amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda atık lastikten elde edilen pirolitik yakıt ile dizel yakıtı farklı oranlarda harmanlayarak motorun yanma, performans, emisyon özellikleri üzerine, üretilen atık lastik yağının etkilerini deneysel olarak araştırmaktır. Elde edilen deneysel sonuçlara dayanarak, aşağıdaki sonuçlara ulaşılabilir:

- Lastik atığından elde edilmiş ve yakıt özellikleri iyileştirmiş pirolitik yakıt saf dizel yakıtı benzer özelliklere sahiptir.
- Motor üzerinde hiçbir modifikasyona gerek kalmaksızın dizel yakıtı içerisinde lastik atık yağı eklenerek dizel motor çalıştırılabilir.
- Dizel yakıt içerisindeki pirolitik yakıt yüzesi arttıkça tutuşma gecikmesi artmıştır.
- Düşük motor yüklerinde, BSFC, karışımlardaki pirolitik yakıt yüzesi artışına bağlı olarak arttı, ancak BTE tersine azaldı. Bunun ana nedeni şüphesiz pirolitik yakıtın, saf dizel yakıttan daha düşük LHV değerine sahip olmasıdır.
- Motor yükünün ve karışımlardaki pirolitik yakıt içeriğinin artmasıyla, silindir içi basınç ve ISO önemli ölçüde artmıştır. Bu durum pirolitik yakıtın dizel yakıtı kıyasla daha düşük bir setan sayısına sahip olmasıyla açıklanabilir.
- En yüksek silindir içi basınç değeri P45D55 yakıtı ile 1250 W motor yükünde sağlanmıştır. P45D55 yakıtı ile 1250 W motor yükünde dizel yakıtı ile elde edilen silindir içi basınç değerinden %4.64 daha fazla silindir içi basınç değeri elde edilmiştir.

- Test yakıtlarındaki oksijen içeriği bakımından her iki yakıt türü de birbirine çok yakındır. Bu nedenle, tüm test yakıtları için CO emisyonunda dikkate değer bir farklılık yoktur.
- Karışımlardaki pirolitik yakıt içeriğinin artmasına bağlı olarak, HC emisyonu önemli ölçüde azalmıştır. Bu sonuç üretilen pirolitik yakıtın hidrojen içeriği saf dizel yakıtından daha yüksek olmasıyla açıklanabilir.
- Karışımlardaki pirolitik yakıt içeriğinin artmasına bağlı olarak, NO<sub>x</sub> emisyonlarında artış gözlemlenmiştir. NO<sub>x</sub> emisyonlarındaki bu artış pirolitik yakıt içeriğindeki aromatik içeriğin ve yakıtının yoğunluğunu fazla olmasından kaynaklanabilir.

Gelecek çalışmalarda aşağıdaki öneriler dikkate alınabilir.

- Uzun süreli motor deneyleri yapılarak pirolitik yakıt kullanımının motor üzerindeki etkileri ve aşındırıcı etkileri araştırılabilir.
- Farklı oranlarda pirolitik yakıt (daha yüksek pirolitik yakıt oranları) kullanılarak motor performansına ve egzoz emisyonlarına olan etkileri incelenebilir.
- Pirolitik yakıt için çevre kirliliği maliyet analizleri yapılabilir.
- Pirolitik yakıt için enerji ve exerji analizleri yapılabilir.
- Pirolitik yakıt ile birlikte üçüncü bir yakıt kullanılarak motor egzoz emisyonları iyileştirme çalışmaları yapılabilir.
- Pirolitik yakıt saflaştırma ve kükürt giderme işlemleri farklı kimyasallarla yapılabilir.
- Pirolitik yakıt saflaştırma ve kükürt giderme işlemleri için farklı prosesler oluşturulup saflaştırma ve kükürt giderme sürecini için daha basit bir proses oluşturulabilir.

## KAYNAKLAR

1. European tyre and rubber manufacturers' association (ETRMA). <https://www.etrma.org/>, *Yıllık rapor*. [Erişim tarihi: 27.01.2020]
2. Frigo, S., Seggiani, M., Puccini, M., & Vitolo, S., "Liquid fuel production from waste tyre pyrolysis and its utilisation in a Diesel engine", *Fuel*, **116**, 399-408 (2014).
3. Hylands, K. N., Shulman, V., "Civil engineering applications of tyres", *Viridis Report VR5, Crowthorne, TRL Ltd., England*, <http://www.viridis.co.uk> (2003).
4. Doğan, O., Celik, M. B., & Özdalyan, B., "The effect of tire derived fuel/diesel fuel blends utilization on diesel engine performance and emissions", *Fuel*, **95**, 340-346. (2012).
5. Jeong, C. S., Kang, J., "Effects of fuel composition and properties on autoignition of automotive diesel engine", *Applied Chemistry*, **4** (1): 125-128 (2000).
6. Krieger, R. B., Borman, G.L., "The computation of applied heat release for internal combustion engines", *ASME Paper, No.66-WA/DGP-4* (1966).
7. Oh, S. K., Baik, D. S., and Han, Y. C., "Emission characteristics in ultra low sulfur diesel", *International Journal of Automotive Technology*, **4** (2): 95-100 (2003).
8. Emissions-Control Technology for Diesel Engines; *Robert BOSCH GmbH* (2005).
9. Internal Combustion Engine Fundamentals, J.B. Heywood, McGraw Hill *International Edition* (1988).
10. European standard for gasoline (1999). *EN 228/1999 and for diesel EN 590/1999*
11. Erwin, J., "Assay of diesel fuel components properties and performance", *Symposium on Processing and Product Selectivity on Synthetic Fuels, Washington D.C., USA, 1915-1923*, August 23-28 (1992).



12. Yang, C., Kidoguchi, Y., Kato, R., and Miwa, K., "Effects of fuel properties on combustion and emissions of a direct-injection diesel engine", *Bulletin of the M.E.S.J.*, 28 (2): 55-62 (2000).
13. Giakoumis, E. G., & Sarakatsanis, C. K., "Estimation of biodiesel cetane number, density, kinematic viscosity and heating values from its fatty acid weight composition", *Fuel*, 222, 574–585 (2018).
14. Murugan, S., Ramaswamy, M. C., & Nagarajan, G., "Performance, emission and combustion studies of a DI diesel engine using Distilled Tyre pyrolysis oil-diesel blends", *Fuel Processing Technology* (2008).
15. Ejder, S. B., "Etanol-dizel, biyodizel-dizel yakıt karışımlarının kullanımının motor performansına etkilerinin deneysel araştırılması", *Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi FBE*, İstanbul (2007).
16. İnternet: American Clean Energy Systems Inc., "The impact of changes in diesel fuel's specifications", ACES, USA, [http://www.americancleanenergysystems.com/americancleanenergysystem/s/HOME\\_files/Impact%20of%20Changes%20in%20Diesel%20Fuel.pdf](http://www.americancleanenergysystems.com/americancleanenergysystem/s/HOME_files/Impact%20of%20Changes%20in%20Diesel%20Fuel.pdf) (2011).
17. Li, D., Zhen, H., Xingcai, L., Wu-gao, Z., and Jian-guang, Y., "Physicochemical properties of ethanol-diesel blend fuel and its effect on performance and emissions of diesel engines", *Renewable Energy* 30 (6): 967-976 (2005).
18. S. Vilcekova, "Indoor Nitrogen Oxides", *Advanced Air Pollution, InTech* (2011).
19. Ma, Z., Huang, Z., Li, C., Wang, X., and Miao, H., "Effects of fuel injection timing on combustion and emission characteristics of a diesel engine fueled with diesel-propane blends", *Energy & Fuels*, 21 (3): 1504-1510 (2007).
20. Sharma, A., & Murugan, S. "Effect of blending waste tyre derived fuel on oxidation stability of biodiesel and performance and emission studies of a diesel engine", *Applied Thermal Engineering*, 118, 365–374 (2017).
21. Ergenç, A. T., "Biodiesel yakıt ile çalışan motordaki püskürtmenin performans ve emisyon yönünden optimizasyonu", *Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi FBE*, İstanbul, 12-13 (2009).

22. Merker, G., P., Schwarz, C., Stiesch, G., and Otto, F., "Simulating combustion simulation of combustion and pollutant formation for engine-development", *Springer-Verlag Berlin Heidelberg*, Germany, 60-140 (2006).
23. Rakopoulos, C. D., Giakoumis, E. G., "Diesel engine transient operation-principles of operation and simulation analysis", *Springer-Verlag London Limited*, Tempere, Finland, 141-178 (2009).
24. İlkılıç, C., & Aydın, H., "Fuel production from waste vehicle tires by catalytic pyrolysis and its application in a diesel engine", *Fuel Processing Technology*, 92(5), 1129-1135 (2011).
25. Altun, Ş., "Performance and exhaust emissions of a DI diesel engine fueled with waste cooking oil and inedible animal tallow methyl esters", *Turkish J. Eng. Env. Sci.*, 35 (2): 107-114 (2011).
26. Ozsezen, A. N., Canakci, M., Turkcan, A., and Sayin, C., "Performance and combustion characteristics of a DI diesel engine fueled with waste palm oil and canola oil methyl esters", *Fuel*, 88 (4): 629-636(2009).
27. Ozsezen, A. N., Canakci, M., and Sayin, C., "Effects of biodiesel from used frying palm oil on the performance, injection, and combustion characteristics of an indirect injection diesel engine", *Energy and Fuels*, 22 (2): 1297-1305 (2008).
28. Utlu, Z., Koçak, M. S., "The effect of biodiesel fuel obtained from waste frying oil on direct injection diesel engine performance and exhaust emissions", *Renewable Energy*, 33 (8): 1936-1941 (2008).
29. Ya-fen, L., Yo-ping, G. W., and Chang-Tang, C., "Combustion characteristics of waste-oil produced biodiesel/diesel fuel blends", *Fuel*, 86 (12–13): 1772- 1780 (2007).
30. Dorado, M. P., Ballesteros, E., Arnal, J. M., Gómez, J., and López, F. J., "Exhaust emissions from a diesel engine fueled with transesterified waste olive oil", *Fuel*, 82 (11): 1311-1315 (2003).
31. Prakash, R., Singh, R. K., and Murugan, S., "Performance and emission studies in a diesel engine using bio oil-diesel blends", *2nd Int. Conf. on Envi. Science and Tech. (ICEST2011)*, Singapore, 428-433, February 26-28 (2011).
32. Bertoli, C., Alessio, J. D., Del Giacomo, N., Lazzaro, M., Massoli, P., and Moccia, V., "Running light-duty DI diesel engines with wood pyrolysis oil", *SAE 2000-01-2975* (2000).
33. Arpa, O., Yumrutaş, R., and Argunhan, Z., "Experimental investigation of the effects of diesel-like fuel obtained from waste lubrication oil on engine performance and exhaust emission", *Fuel Processing Technology*, 91 (10): 1241-1249 (2010).

34. Sugözü, İ., Aksoy, F., ve Baydır, Ş. A., "Atık motor yağının alternatif yakıt olarak bir dizel motorunda kullanılması", *Taşıt Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 1 (1): 9-16 (2009).
35. Arpa, O., Yumrutaş, R., ve Kaşka, Ö., "Atık motor yağından elde edilen dizel benzeri yakıtın motor performans ve eksoz emisyonu üzerindeki etkilerinin incelenmesi", *VII. Ulusal Temiz Enerji Sempozyumu UTES'2008*, İstanbul, 293-304 (2008).
36. Mani, M., Nagarajan, G., and Sampath, S., "Characterisation and effect of using waste plastic oil and diesel fuel blends in compression ignition engine", *Energy*, 36 (1): 212–219 (2011).
37. Mani, M., Nagarajan, G., and Sampath, S., "An experimental investigation on a DI diesel engine using waste plastic oil with exhaust gas recirculation", *Fuel*, 89 (8): 1826-1832 (2010).
38. Mani, M., Nagarajan, G., "Influence of injection timing on performance, emission and combustion characteristics of a DI diesel engine running on waste plastic oil", *Energy*, 34 (10):1617-1623 (2009).
39. Nişancı, S., "Biyodizel yakıt karışımlarının performans ve emisyon üzerine etkilerinin deneysel araştırılması", (*PhD Thesis., Yüksek Lisans Tezi*), *Yıldız Teknik Üniversitesi*, İstanbul (2007).
40. Ertaş, M., "Bazı Artık Biyokütlelerin Yavaş Pirolyzi Ve Pirolyz Ürünlerinin Karakterizasyonu." (*Doctoral dissertation, Doktora Tezi*), *Sütçü İmam Üniversitesi*, Kahramanmaraş (2010).
41. Uyumaz, A., Aydoğan, B., Solmaz, H., Yılmaz, E., Hopa, D. Y., Bahtli, T. A., Aksoy, F., "Production of Waste Tyre Oil and Experimental Investigation on Combustion, Engine Performance and Exhaust Emissions", *Journal of the Energy Institute* (2018).
42. Hürdoğan, E., Ozalp, C., Kara, O., & Ozcanli, M., "Experimental investigation on performance and emission characteristics of waste tire pyrolysis oil-diesel blends in a diesel engine", *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(36), 23373-23378 (2017).
43. Wang, W.-C., Bai, C.-J., Lin, C.-T., & Prakash, S., "Alternative fuel produced from thermal pyrolysis of waste tires and its use in a diesel engine", *Applied Thermal Engineering* (2016).
44. Aydın, H., & İlkılıç, C., "Analysis of combustion, performance and emission characteristics of a diesel engine using low sulfur tire fuel." *Fuel*, 143, 373-382 (2015).

45. Hürdoğan, E., Ozalp, C., Kara, O., & Ozcanli, M., “Experimental investigation on performance and emission characteristics of waste tire pyrolysis oil-diesel blends in a diesel engine”, *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(36), 23373-23378 (2017).
46. Lahane S, Subramanian KA., "Impact of nozzle holes configuration on fuel spray, wall impingement and NO x emission of a diesel engine for biodiesel–diesel blend (B20)", *Applied Thermal Engineering*; 64(1):307-314 (2014).
47. Farhat Ali, M., Al-Malki, A., El-Ali, B., Gary Martinie, G., and Siddiqui, M.N., “Deep desulfurization of gasoline and diesel fuels using non-hydrogen consuming techniques”, *Fuel*, 85, 1354-1363 (2006).
48. Lam, S. S., Russell, A. D., Lee, C. L., & Chase, H. A., “Microwave-heated pyrolysis of waste automotive engine oil: Influence of operation parameters on the yield, composition, and fuel properties of pyrolysis oil”, *Fuel*, 92(1), 327-339 (2012).
49. Heywood, J., "Internal combustion engine fundamentals", *McGraw-Hill*. New York (1988).
50. Karatas, H., Olgun, H., Akgun, F., “Experimental results of gasification of waste tire with air & CO<sub>2</sub>, air & steam and steam in a bubbling fluidized bed gasifier”, *Fuel Process Technology*, 102, 166–174 (2012).
51. Laresgoiti, M. F., Caballero, B. M., Marco, I De., Torres, A., Cabrero, M. A., “Chomón M. J., Characterization of the liquid products obtained in tyre pyrolysis”, *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 71, 917–34 (2014).
52. Barbooti, M. M., Mohamed, T. J., Hussain, A. A., Abas, F. O., “Optimization of pyrolysis conditions of scrap tires under inert gas atmosphere”, *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 72, 165–70 (2004).
53. Ucar, S., Karagoz, S., Yanik, J., Yuksel, M., Saglam, M., “Upgrading scrap tire derived oils using activated carbon supported metal catalysts”, *Energy Sources Part A*, 29, 425-437 (2007).
54. Chen, T., Shen, Y., Lee, W., Lin, C., Wan, M., “An economic analysis of the continuous ultrasound-assisted oxidative desulfurization process applied to oil recovered from waste tires”, *Journal of Clean Production*, 39, 129–136 (2013).
55. Jantaraksa, N., Prasassarakich, P., Reubroycharoen, P., Hinchiranan, N., “Cleaner alternative liquid fuels derived from the hydrodesulphurization of

- waste tire pyrolysis oil”, *Energy Conversion and Management*, 95, 424–434 (2015).
56. Unapumnuk, K., Keener, T. C., Lu, M., Liang, F., “Investigation into the removal of sulfur from tire derived fuel by pyrolysis”, *Fuel*, 87, 951–956 (2008).
  57. Bunthid, D., Prasassarakich, P., Hinchiranan, N., “Oxidative desulfurization of tire pyrolysis naphtha in formic acid/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/pyrolysis char system”, *Fuel*, 89, 2617–2622 (2010).
  58. Al-lal, A., Bolonio, D., Llamas, A., Lapuerta, M., Canoira, L., “Desulfurization of pyrolysis fuels obtained from waste: lube oils, tires and plastics”, *Fuel*, 150, 208–216 (2015).
  59. König, J., “Cylinder-pressure based injector calibration for diesel engines”, Msc. Thesis, *KTH Royal Institute of Technology School of Electrical Engineering*, Stockholm, Sweden, 9-15 (2008).
  60. Ağbulut, Ü., Sarıdemir, S., & Albayrak, S., “Experimental investigation of combustion, performance and emission characteristics of a diesel engine fuelled with diesel–biodiesel–alcohol blends”, *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 41(9), 389 (2019).
  61. Brown, B. R., "Combustion data acquisition and analysis", *Final Year Project, Loughborough University, M. Eng. Automotive Engineering*, 12-45 (2001).
  62. Checkel, M. D., Dale, J. D., "Computerized knock detection from engine pressure records", *SAE Paper 860028* (1986).
  63. Internet: Low-noise Lanczos Differentiators, <http://www.holoborodko.com/pavel/numerical-methods/numerical-derivative/lanczos-low-noise-differentiators/> (2011).
  64. Emiroğlu, A. O., & Şen, M., “Combustion, performance and exhaust emission characterizations of a diesel engine operating with a ternary blend”, *Applied Thermal Engineering*, 133, 371-380 (2018).
  65. Kalargaris, I., Tian, G., Gu, S., " Combustion, performance and emission analysis of a DI diesel engine using plastic pyrolysis oil", *Fuel Processing Technology*, 157, 108-115 (2017).

66. G. Nagarajan, S. Renganarayanan, A.N. "Rao Emission and performance characteristics of neat ethanol fuelled DI diesel engine", *Int J Ambient Energy*, 23 (3) (2002), pp. 149-158
67. Kumar, M. S., Kerihuel, A., Bellettre, J., andTazerout, M., "Ethanolanimalfatemulsions as a diesel engine fuel-Part 2: Engine test analysis", *Fuel*, 85 (17- 18): 2646-2652 (2006).
68. Zhu, R. J., Wang, X. B., Miao, H. Y., and Huang, Z. H., "Combustion and particulate emission characteristics of a diesel engine fuelled with diesel134 dimethoxymethane blends", *Proc. Inst. Mech. Eng., Journal of Automobile Engineering*, 224(4): 521-531 (2010).
69. Huang, Z., Lu, H., Jian, D., Zeng, K., Liu, B., Zhang, J., and Wang, X., "Combustion behaviors of a compression-ignition engine fuelled with diesel/methanol blends under various fuel delivery advance angles", *Bioresource Technology* 95 (3): 331–341 (2004).

**EK AÇIKLAMALAR A**

**EGZOS EMİSYON CİHAZI KALİBRASYON SERTİFİKASI**



# Bilsa-lab

**Bilsa Bilgisayar ve Teknik Cihazlar Sanayi ve Ticaret Ltd Şti.**

Esenşehir Mah. Kürkçüler Cad. Arslan Sok. No:14/B  
Yukarıdundulu Ümraniye İstanbul  
Tel : +90 216 508 23 12 Fax : +90 216 508 23 13  
www.bybilsa.com info@bilsaltd.com



: SE-01.19-0070

## Kalibrasyon Sertifikası

Sayfa (Page) 1/3

(Calibration Certificate)

**Cihazın Sahibi / Adresi** : Karabük Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Mekatronik Mühendisliği Bölümü .  
(Customer/ Address) Balıklar Kayası Mevkii, 100. Yıl  
/Karabük

**Makine / Cihaz** : BENZİNLİ LPG EGZOZ EMİSYON CİHAZI  
(Device)

**Tip** : MOD 2210 WINXP  
(Type)

**İmalatçı** : BİLSA LTD  
(Manufacturer)

**Seri Numarası** : 101235  
(Serial Number)

**Kalibrasyon Tarihi** : 15.02.2019  
(Date Of Calibration)

**İstek No** : SE-01.19-0070  
(Order No)

**Sayfa Sayısı** : 3  
(Number of pages)

**Bu sertifikanın tamamlayıcı kısmı olan ölçüm sonuçları, genişletilmiş ölçüm belirsizlikleri ve kalibrasyon metodları takip eden sayfalarda verilmiştir.**

Measurement results, expanded measurement uncertainties and calibration methods which are the complementary parts of this certificate, are given in the following parts.

Mühür  
Seal

Kalibrasyon Yapan  
Calibrated By  
**A.Erhan ACAR**

Laboratuvar Müdürü  
Head of the Calibration Laboratory  
**Harun ÜNAL**

  
**BİLSA**  
BİLGİSAYAR VE TEKNİK CİHAZLAR SAN. VE TİC.LTD.ŞTİ.  
Esenşehir Mah. Kürkçüler Cad. Arslan Sokak  
No.14/B Y.Ündülli Ümraniye 34776 İSTANBUL  
Ticaret Sicil No : 263180 SARIGAZI V.D. 1750021085

**Bu sertifika, Bilsalab'ın yazılı izni olmadan kopyalanıp çoğaltılamaz. İmzasız ve Kaşesiz sertifikalar geçersizdir.**

This certificate will not be reproduced other than in full except with the permission of the company. Calibration certificates without signature and stamp are not valid.

F.28.02

KALİBRASYON SERTİFİKASI



Sayfa (Page) 2/3

**Cihaz (Instrument)**

**Cihazın Adı** : Benzinli LPG Egzoz Emisyon Cihazı  
**Marka** : BİLSA  
**Model** : MOD 2210 WINXP

**Kalibrasyonun Yapıldığı Yer/Place of the Calibration**

Kalibrasyon Bilsalab Laboratuvar'ında yapılmıştır.

**Prosedür (Procedure)**

ISO PAS 3930 ve 2014/32/EU ölçü aletleri direktifine göre hazırlanmış PR.34 Egzoz Gaz Analiz Cihazı Deney ve Kalibrasyon Prosedürüne göre yapılmaktadır.

**Ölçüm Şartları**

Laboratuvar ortam şartlarında kalibre edilmiştir.

**Çevre Şartları (Environmental Conditions)**

Ortam Sıcaklığı / Ambient temperature (20,5 ± 3) °C  
Nem / Relative humidity (37,5 ± 10) % RH  
Hava Basıncı / Air Pressure (1020 ± 10) mmHg

**Ölçüm Sonuçları (Measurement Results)**

Arka sayfada verilmiştir. / Given in the next page.

**Ölçüm Belirsizliği (Measurement Uncertainty)**

Kalibrasyon sonuçları 3. Sayfada Verilmiştir.

Beyan edilen genişletilmiş ölçüm belirsizliği, standard belirsizliğin, k=2 olarak alınan genişletme katsayısı ile çarpımı sonucunda bulunan değerdir ve %95 oranında güvenilirlik sağlamaktadır.

The reported expanded uncertainty of measurement is stated as the standard uncertainty of measurement multiplied by coverage factor k=2, which for a normal distribution corresponds to coverage probability of approximately 95%.

**Kalibrasyonda Kullanılan Teçhizat (Calibration Equipment)**

|                       | Seri No / Serial No | Sertifika /Certificate No | İzlenebilirlik /Traceability |
|-----------------------|---------------------|---------------------------|------------------------------|
| REFERANS GAZ KARIŞIMI | 03106824            | Bilsa 01-18               | HAT GRUP                     |

**Gerektiğinde Yorum (Remarks)**



**Bilsa-lab**

Sertifika No

SE-01.19-0070

Sayfa (Page) 3/3

PEF : 0,537

| Ölçülen Gaz  | Referans Gaz Değerleri | Ölçülen Gaz Değerleri | Sapma %<br> Δ                         | Ölçüm Belirsizliği |
|--------------|------------------------|-----------------------|---------------------------------------|--------------------|
| CO (%)       | 1,51                   | 1,52                  | 0,01                                  | ± %2               |
| CO2 (%)      | 12,01                  | 12,02                 | 0,01                                  | ± %2               |
| O2 (%)       | 0,00                   | 0,01                  | 0,01                                  | ± %2               |
| Propan (ppm) | 997 propan             |                       | PEF ile çarpılarak HC değeri bulunur. |                    |
| HC (ppm)     | 536                    | 536                   | 0                                     | ± %2               |

AÇIKLAMA : Tavsiye edilen kalibrasyon periyodu bir yıldır; ancak cihazın kalibrasyonunda oluşacak Kaymalar veya cihazın arızalanması durumunda, cihaz daha erken kalibrasyona gönderilmelidir.

**Uygunluk Beyanı/Statement Of Conformity**

Kalibrasyonu yapılan Cihaz, 2014/32/EU ölçü aletleri direktifindeki şartları sağlamaktadır.  
ISO PAS 3930 Standardı toleransları içerisinde olup, UYGUNDUR.

  
BİLGİSAYAR VE ELEKTRİK CİHAZLAR SAN. VE TİC. LTD. ŞTİ.  
Esenyurt Mah. Kökçüler Cad. Arslan Sokak  
No:14/B Y.Ö.Ü.Ü. / Ümraniye 34776 İSTANBUL  
Ticaret Sicil No: 273390 SARIĞAZI V.D. 1750031065

## **ÖZGEÇMİŞ**

Sercan UZUN 1992 yılında Karabük'te doğdu. İlk öğrenim, orta öğrenim ve lise öğrenimini Safranbolu'da tamamladı. 2010 yılında Bursa Uludağ Üniversitesi Makine Mühendisliği bölümünde öğrenime başladı ve 2015 Haziran ayında mezun oldu. 2015 Kasım ayı içerisinde Bursa ÇEMTAŞ Demir-Çelik fabrikasında mekanik bakım mühendisi olarak görev yaptı. 2 yıllık çalışma deneyiminden sonra Karabük'te kendi doğalgaz şirketini (4S Mühendislik) kurdu ve hala devam etmektedir. Aynı zamanda yazar Safranbolu Ticaret Sanayi Odası'nda bilirkişilik yapmaktadır.

### **ADRES BİLGİLERİ**

Adres : Atatürk Mah Sadri Artunç Cad No:80/2 Safranbolu/KARABÜK  
Tel : 0(532) 177 39 78  
E-posta : uzunsercan@outlook.com.tr