



**T.C.  
BATMAN ÜNİVERSİTESİ  
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ  
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**NANO TİTANYUM-DİOKSİT KATKILI YAKIT  
KARIŞIMLARININ BİR DİZEL MOTORDA KULLANIMININ  
ARAŞTIRILMASI**

**Aytaç ATMACA**

**Kasım-2024  
BATMAN**

T.C.  
BATMAN ÜNİVERSİTESİ  
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ  
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

NANO TİTANYUM-DİOKSİT KATKILI YAKIT  
KARIŞIMLARININ BİR DİZEL MOTORDA KULLANIMININ  
ARAŞTIRILMASI

Aytaç ATMACA

Danışman  
Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Ali KALLIOĞLU

Diğer Jüri Yeleri

Doç. Dr. Hakan KARAKAYA Dr. Öğr. Üyesi M. Ali KALLIOĞLU

Dr. Öğr. Üyesi Ömer GENÇ

Kasım-2024  
BATMAN

## TEZ KABUL VE ONAYI

Aytaç ATMACA tarafından hazırlanan “Nano Titanyum-Dioksit Katkılı Yakıt Karışımlarının Bir Dizel Motorda Kullanımının Araştırılması” adlı tez çalışması 07/11/2024 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Batman Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

### Jüri Üyeleri

#### Başkan

Doç. Dr. Hakan KARAKAYA

#### Danışman

Dr. Öğr. Üyesi M.Ali KALLIOĞLU

#### Üye

Dr. Öğr. Üyesi Ömer GENÇ

### İmza

.....

.....

.....

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Dr. Öğr. Üyesi Ömer Murat ÖTER  
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

## ETİK BEYANI

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını beyan eder, aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sorumluluğu kabullendiğimi bildiririm.

## ETHICAL DECLARATION

I declare that all the information in this thesis has been obtained within the framework of ethical behavior and academic rules, and that the source of any statements and information that do not belong to me in this study prepared in accordance with the thesis writing rules has been fully cited, and I declare that I accept all kinds of legal responsibility in case of any contrary situation.

Aytaç ATMACA  
Tarih:07.11.2024

## ÖZET

### YÜKSEK LİSANS TEZİ

#### NANO TİTANYUM-DİOKSİT KATKILI YAKIT KARIŞIMLARININ BİR DİZEL MOTORDA KULLANIMININ ARAŞTIRILMASI

AYTAÇ ATMACA

Batman Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Ali KALLIOĞLU

2024, 100 Sayfa

Bu çalışmada, Eurodizel yakıtına farklı konsantrasyonlarda (25 ppm, 50 ppm, 75 ppm ve 100 ppm)  $\text{TiO}_2$  nano-partikül katkı maddesi eklenerek, tek silindirli bir dizel motorda yanma, performans ve emisyon parametreleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. Artan nanopartikül konsantrasyonlarının test yakıtlarında başlangıç durumu olan saf dizel yakıtıyla karşılaştırıldığında, yanma analizlerinde silindir iç basıncı ve net ısı salınımının arttığı gözlemlenmiştir. Performans parametrelerinden efektif verim ve egzoz gazı sıcaklığı artarken, özgül yakıt tüketimi ve özgül enerji tüketimi değerleri azalmıştır. Emisyon değerlerinde ise  $\text{NO}_x$  hariç, CO, HC ve duman emisyonlarının başlangıç durumuna göre azaldığı tespit edilmiştir. Bu azalış ve artış eğilimleri, nanopartikül dozajıyla paralellik göstermektedir. Deneysel bulgulardan elde edilen veriler, ikinci aşamada Yanıt Yüzeyi Metodu (RSM) kullanılarak sekiz farklı matematiksel model oluşturulmuştur. Oluşturulan eşitlikler, nanopartikül konsantrasyonu ve motor yükü girdi parametrelerine dayanmakta olup,  $R^2 \geq 0,9090$  istatistiksel sonuçları elde edilmiştir. Elde edilen tüm veriler, beş farklı koşula göre optimum  $\text{TiO}_2$  miktarını ve motor yükünü belirlemek için optimize edilmiştir. Tüm modellerde optimum nanopartikül oranının 100 ppm ve motor yükünün 0,3 OEB ile 2,89 OEB arasında değişkenlik gösterdiği belirlenmiştir. Bu sonuçlar, performans ve emisyonlar arasında bir denge kurulmasının önemini vurgulamaktadır. Bu çalışmayla, içten yanmalı motorlarla ilgili gelecekteki araştırmalarda hem akademik hem de endüstriyel kullanıcılara rehberlik etmeyi amaçlamaktadır.

**Anahtar Kelimeler:** Dizel motor, Emisyon, Optimizasyon, Performans, YYM,  $\text{TiO}_2$

## **ABSTRACT**

### **MASTERS THESIS**

#### **INVESTIGATION OF THE USE OF NANO TITANIUM-DIOXIDE DOPED FUEL MIXTURES IN A DIESEL ENGINE**

**Aytaç ATMACA**

**Batman University Graduate Education Institute**

**Mechanical Engineering Department of Science**

**Advisor: Assist. Prof. Mehmet Ali KALLIOĞLU**

**2024, 100 Pages**

In this study, TiO<sub>2</sub> nanoparticle additives were added to Eurodiesel fuel at different concentrations (25 ppm, 50 ppm, 75 ppm and 100 ppm) and their effects on combustion, performance and emission parameters in a single cylinder diesel engine were investigated. It was observed that increasing nanoparticle concentrations increased the cylinder internal pressure and net heat release in combustion analyses compared to the starting state of pure diesel fuel in test fuels. Among the performance parameters, effective efficiency and exhaust gas temperature increased, while specific fuel consumption and specific energy consumption values decreased. In emission values, except NO<sub>x</sub>, CO, HC and smoke emissions have decreased compared to the initial condition. These decreasing and increasing trends are in parallel with the nanoparticle dosage. Eight different mathematical models were created by using the Response Surface Method (RSM) in the second stage. The equations are based on the input parameters of nanoparticle concentration and engine load, and statistical results of  $R^2 \geq 0.9090$  were obtained. All data obtained were optimised to determine the optimum TiO<sub>2</sub> amount and engine load according to five different conditions. In all models, it was determined that the optimum nanoparticle ratio was 100 ppm and the engine load varied between 0.3 BMEP and 2.89 BMEP. These results emphasise the importance of establishing a balance between performance and emissions. This study aims to guide both academic and industrial users in future research on internal combustion engines.

**Keywords:** Diesel engine, Emission, Optimization, Performance, RSM, TiO<sub>2</sub>

## ÖNSÖZ

Tez çalışmamın her aşamasında katkılarını hiçbir zaman eksik etmeyen danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Ali KALLIOĞLU'na teşekkür eder saygılarımı sunarım.

Maddi ve manevi desteklerini hiçbir zaman eksik etmeyen kardeşlerim Alper ATMACA ve Seydihan Ümit ATMACA'ya teşekkür ederim.

Bana her türlü desteği veren her anımda yanımda olan sevgili eşim Meryem NURAY ATMACA'ya teşekkür ederim.

Aytaç ATMACA  
BATMAN-2024



## İÇİNDEKİLER

|                                                                                                |      |
|------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| ÖZET .....                                                                                     | v    |
| ABSTRACT.....                                                                                  | vi   |
| ÖNSÖZ .....                                                                                    | vii  |
| ÇİZELGELER LİSTESİ .....                                                                       | x    |
| ŞEKİLLER LİSTESİ .....                                                                         | xi   |
| SİMGELER VE KISALTMALAR .....                                                                  | xiii |
| 1. GİRİŞ .....                                                                                 | 1    |
| 1.1 Nanopartiküller ve Özellikleri .....                                                       | 4    |
| 1.2 Amaç ve Kapsam .....                                                                       | 5    |
| 1.3 Nano-Partikül Madde Miktarının Belirlemesi .....                                           | 5    |
| 2. KAYNAK ARAŞTIRMASI .....                                                                    | 6    |
| 3. DİZEL MOTORLAR .....                                                                        | 15   |
| 3.1. Dizel Motorların Tarihçesi.....                                                           | 15   |
| 3.2. Dizel Yakıtlı Motorlarda Yanma ve Yanma Aşamaları .....                                   | 15   |
| 3.2.1. Tutuşma gecikmesi .....                                                                 | 16   |
| 3.2.2. Ani yanma.....                                                                          | 17   |
| 3.2.3. Kontrollü yanma .....                                                                   | 17   |
| 3.2.4. Art yanma .....                                                                         | 18   |
| 3.3. Dizel Motorlarda Kullanılan Yakıtların Başlıca Özellikleri.....                           | 18   |
| 3.3.1 EuroDizel yakıt (B7).....                                                                | 18   |
| 4. MATERYAL VE YÖNTEM.....                                                                     | 22   |
| 4.1 Deneyde Kullanılan Dizel Yakıtlı Motorun Teknik Özellikleri .....                          | 22   |
| 4.2 Deney İçin Kullanılan ICEngineSoft 9.0 Programı .....                                      | 23   |
| 4.3 Deney İçin Kullanılan Gaz Analiz Cihazı .....                                              | 23   |
| 4.4. Deneyde Kullanılan TiO <sub>2</sub> Katkısı .....                                         | 24   |
| 4.4.1. Deneyde kullanılan TiO <sub>2</sub> katkısının teknik özellikleri ve sem görüntüsü..... | 25   |
| 4.5 Deneyde Kullanılan Yakıtların Hazırlanması.....                                            | 27   |
| 4.6 Yüzey yanıt metodu (YYM) .....                                                             | 29   |
| 4.7 Belirsizlik Analizi .....                                                                  | 33   |
| 4.8 İstatiksel Analiz Metodları.....                                                           | 34   |
| 4.8.1 MPE % (Ortalama Yüzde Hatası).....                                                       | 34   |
| 4.8.2 MAPE (Ortalama Mutlak Yüzde Hatası).....                                                 | 34   |
| 4.8.3 SSRE (Görelî Hataların Karesel Toplamı) .....                                            | 34   |
| 4.8.4 RSE (Görelî Standart Hata) .....                                                         | 34   |



|                                                     |            |
|-----------------------------------------------------|------------|
| 4.8.5 MBE (Ortalama Yanlılık Hatası).....           | 35         |
| 4.8.6 RMSE (Kök Ortalama Karesel Hata) .....        | 35         |
| 4.8.7 t-stat (t-istatistiği).....                   | 35         |
| <b>5. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA .....</b>     | <b>36</b>  |
| 5.1. Performans Analizi .....                       | 36         |
| 5.1.1. Özgül yakıt tüketimi (ÖYT) .....             | 36         |
| 5.1.2. Özgül enerji tüketimi (ÖET).....             | 37         |
| 5.1.3. Efektif verim .....                          | 39         |
| 5.1.4. Egzoz gaz sıcaklığı .....                    | 41         |
| 5.2. Emisyon Analizi .....                          | 43         |
| 5.2.1. HC emisyonları .....                         | 44         |
| 5.2.2. CO emisyonları .....                         | 46         |
| 5.2.3. No <sub>x</sub> emisyonları .....            | 48         |
| 5.2.4. Duman koyuluğu (İS) .....                    | 50         |
| 5.3. Yanma Analizi .....                            | 52         |
| 5.3.1. Net ısı salınımı .....                       | 52         |
| 5.3.2. Silindir basıncı .....                       | 56         |
| 5.3.3. Kümülatif ısı salınımı .....                 | 60         |
| 5.3.4. Basınç artış oranı .....                     | 64         |
| 5.4. Yüzey Yanıt Yöntemi (Yym) Metodu .....         | 67         |
| 5.4.1. Efektif Verim YYM analizi .....              | 69         |
| 5.4.2. Özgül yakıt tüketimi YYM analizi .....       | 70         |
| 5.4.3. Özgül enerji tüketimi YYM analizi .....      | 72         |
| 5.4.4. Egzoz gazı sıcaklık değeri YYM analizi ..... | 73         |
| 5.4.5. CO değeri YYM analizi .....                  | 74         |
| 5.4.6. NO <sub>x</sub> değeri YYM analizi .....     | 75         |
| 5.4.7. HC değeri YYM analizi .....                  | 76         |
| 5.4.8. Duman koyuluğu değeri YYM analizi.....       | 78         |
| 5.5. Yanıtların Optimizasyonu .....                 | 79         |
| 5.5.1. Optimizasyon-a (tüm yanıtlar).....           | 79         |
| 5.5.2. Optimizasyon-b (Sadece Emisyon) .....        | 80         |
| 5.5.3. Optimizasyon-c (Sadece Performans) .....     | 81         |
| 5.5.4. Optimizasyon-d (Performans Öncelikli).....   | 82         |
| 5.5.5. Optimizasyon-e (Emisyon Öncelikli) .....     | 83         |
| 5.6. İstatiksel Analiz .....                        | 85         |
| 5.6.1. Varyans analizi (ANOVA) .....                | 85         |
| 5.6.2 YYM Model Doğrulaması .....                   | 87         |
| <b>6. SONUÇLAR .....</b>                            | <b>93</b>  |
| <b>KAYNAKLAR .....</b>                              | <b>95</b>  |
| <b>ÖZGEÇMİŞ .....</b>                               | <b>100</b> |

## ÇİZELGELER LİSTESİ

|                                                                                                     |                                         |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|
| Çizelge 2.1. YYM'li bir dizel motorda optimum nanopartikül ilavesinin belirlenmesi.                 | 14                                      |
| Çizelge 3.1. Dizel yakıtların özellikleri (Anonim t.y.-c).....                                      | 21                                      |
| Çizelge 4.1. TiO <sub>2</sub> katkı maddesi teknik özellikleri.....                                 | 25                                      |
| Çizelge 4.2. Test için kullanılan yakıt numuneleri.....                                             | 27                                      |
| Çizelge 4.3. Test yakıtlarının özellikleri .....                                                    | 29                                      |
| Çizelge 4.4. Optimizasyon kriterleri.....                                                           | 32                                      |
| Çizelge 5.1. Test yakıtlarının farklı OEB'lerde frene özgül yakıt tüketim (kg/kWh) değerleri.....   | 37                                      |
| Çizelge 5.2. Test yakıtlarının farklı OEB'lerde özgül enerji tüketim (MJ/kWh) değerleri .....       | 39                                      |
| Çizelge 5.3. Test yakıtlarının farklı OEB'lerde efektif verim (%) değerleri.....                    | 40                                      |
| Çizelge 5.4. Test yakıtlarının farklı OEB'lerde egzoz gazı sıcaklık (°C) değerleri .....            | 43                                      |
| Çizelge 5.5. Test yakıtlarının farklı OEB'lerde HC emisyon (ppm) değerleri.....                     | 46                                      |
| Çizelge 5.6. Test yakıtlarının farklı OEB' ler de CO emisyon (%) değerleri .....                    | 47                                      |
| Çizelge 5.7. Test yakıtlarının farklı OEB' ler de NO <sub>x</sub> emisyon (ppm) değerleri .....     | 50                                      |
| Çizelge 5.8. Test yakıtlarının farklı OEB' ler de duman koyuluğu (m <sup>-1</sup> ) değerleri ..... | 52                                      |
| Çizelge 5.9. Farklı yüklerdeki yakıtların maksimum net ısı salınım değerleri (kJ/der) .             | 55                                      |
| Çizelge 5.10. Farklı yüklerdeki yakıtların maksimum basınç değerleri (bar/der).....                 | 59                                      |
| Çizelge 5.11. Farklı yüklerdeki yakıtların maksimum kümülatif ısı salınım değerleri (kJ/der) .....  | 63                                      |
| Çizelge 5.12. Farklı yüklerdeki yakıtların maksimum basınç artış oranı (dp/dø).....                 | <b>Hata! Yer işareti tanımlanmamış.</b> |
| Çizelge 5.13. YYM için giriş parametreleri ve seviyeler .....                                       | 67                                      |
| Çizelge 5.14. Farklı motor yükü ve TiO <sub>2</sub> miktarına karşılık gelen deneysel sonuçlar ..   | 67                                      |
| Çizelge 5.15. Yanıtların optimizasyonu .....                                                        | 68                                      |
| Çizelge 5.16. R <sup>2</sup> için ANOVA sonuçları .....                                             | 85                                      |
| Çizelge 5.17. Model terimler için p değerleri.....                                                  | 86                                      |
| Çizelge 5.18. Regresyon denklemleri.....                                                            | 86                                      |
| Çizelge 5.19. İstatiksel analiz değerleri.....                                                      | 87                                      |

## ŞEKİLLER LİSTESİ

|                                                                                                                         |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 1.1. Enerji kaynaklarının sınıflandırılması (Erdem ve Kadir 2015).....                                            | 2  |
| Şekil 1.2. 2022 Yılında Dünya Dünyada Tüketilen Birincil Enerji Kaynaklarının Dağılımı (Anonim t.y.-a) .....            | 3  |
| Şekil 3.1. Dizel yakıtlı motorlarda yanma aşamaları (Ergen 2006) .....                                                  | 15 |
| Şekil 4.1. Deney motorunun genel görünümü .....                                                                         | 22 |
| Şekil 4.3. Egzoz emisyon analiz cihazı .....                                                                            | 24 |
| Şekil 4.4. TiO <sub>2</sub> katkı maddesi .....                                                                         | 25 |
| Şekil 4.5. TiO <sub>2</sub> katkı maddesi SEM görüntüsü .....                                                           | 26 |
| Şekil 4.6. Hassas terazi(A) Manyetik karıştırıcı(B) Ultrasonik banyo (C) .....                                          | 28 |
| Şekil 4.7. Dizel yakıtı eklenen TiO <sub>2</sub> katkı maddeli deney yakıtları (D, DTi25, DTi50, DTi75 ve DTi100) ..... | 28 |
| Şekil 4.8. Minitab programına ait ekran görüntüsü .....                                                                 | 30 |
| Şekil 5.1. Test yakıtlarının farklı OEB' ler de özgül yakıt tüketim (kg/kWh) değerleri                                  | 36 |
| Şekil 5.2. Test yakıtlarının farklı OEB' ler de özgül enerji tüketim (MJ/kWh) değerleri .....                           | 38 |
| Şekil 5.3. Test yakıtlarının farklı OEB' ler de efektif verim (%) değerleri.....                                        | 40 |
| Şekil 5.4. Test yakıtlarının farklı OEB' ler de egzoz gaz sıcaklığı (°C) değerleri .....                                | 42 |
| Şekil 5.5. Test yakıtlarının farklı OEB' ler de HC emisyon (ppm) değerleri.....                                         | 45 |
| Şekil 5.6. Test yakıtlarının farklı OEB' lerde CO emisyon (%) değerleri .....                                           | 47 |
| Şekil 5.7. Test yakıtlarının farklı OEB' lerde NO <sub>x</sub> emisyon (ppm) değerleri .....                            | 49 |
| Şekil 5.8. Test yakıtlarının farklı OEB' ler de duman koyuluğu (m <sup>-1</sup> ) değerleri .....                       | 51 |
| Şekil 5.9. Test yakıtları net ısı salınımının krank açısına bağlı değişimleri (0.3 bar OEB) .....                       | 53 |
| Şekil 5.10. Test yakıtları net ısı salınımının krank açısına bağlı değişimleri (1 bar OEB) .....                        | 53 |
| Şekil 5.11. Test yakıtları net ısı salınımının krank açısına bağlı değişimleri (2 bar OEB) .....                        | 54 |
| Şekil 5.12. Test yakıtları net ısı salınımının krank açısına bağlı değişimleri (3 bar OEB) .....                        | 55 |
| Şekil 5.13. 0.3 bar OEB göre krank açısına bağlı silindir basıncı (bar) .....                                           | 56 |
| Şekil 5.14. 1 bar OEB göre krank açısına bağlı silindir basıncı (bar) .....                                             | 57 |
| Şekil 5.15. 2 bar OEB göre krank açısına bağlı silindir basıncı (bar) .....                                             | 58 |
| Şekil 5.16. 3 bar OEB göre krank açısına bağlı silindir basıncı (bar) .....                                             | 59 |
| Şekil 5.17. Test yakıtları kümülatif ısı salınımının krank açısına bağlı değişimleri (0.3 bar OEB).....                 | 60 |
| Şekil 5.18. Test yakıtları kümülatif ısı salınımının krank açısına bağlı değişimleri (1 bar OEB) .....                  | 61 |
| Şekil 5.19. Test yakıtları kümülatif ısı salınımının krank açısına bağlı değişimleri (2 bar OEB) .....                  | 62 |
| Şekil 5.20. Test yakıtları kümülatif ısı salınımının krank açısına bağlı değişimleri (3 bar OEB) .....                  | 62 |
| Şekil 5.21. 0,3 bar OEB göre krank açısına bağlı basınç artış oranı (dp/dθ) .....                                       | 64 |
| Şekil 5.22. 1 bar OEB göre krank açısına bağlı basınç artış oranı (dp/dθ) .....                                         | 65 |
| Şekil 5.23. 2 bar OEB göre krank açısına bağlı basınç artış oranı (dp/dθ) .....                                         | 65 |
| Şekil 5.24. 3 bar OEB göre krank açısına b<br>ağlı basınç artış oranı (dp/dθ) .....                                     | 66 |
| Şekil 5.25. Merkezi karma tasarım (CCD) yöntemi ile girdi parametreleri .....                                           | 68 |
| Şekil 5.26. Hesaplamalara ait girdi ve çıktı parametreleri .....                                                        | 69 |

|                                                                                                                                           |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Şekil 5.27.</b> $\text{TiO}_2$ miktarı ve motor yüküne bağlı EV değişimi için 3d grafiği ve Karşıtlık grafiği.....                     | 69 |
| <b>Şekil 5.28.</b> $\text{TiO}_2$ miktarı ve motor yüküne bağlı EV değişimi için etki grafiği ve etkileşim grafiği .....                  | 70 |
| <b>Şekil 5.29.</b> $\text{TiO}_2$ miktarı ve motor yüküne bağlı olarak ÖYT değişimi için 3d grafiği ve Karşıtlık grafiği.....             | 71 |
| <b>Şekil 5.30.</b> $\text{TiO}_2$ miktarı ve motor yüküne bağlı ÖYT değişimi için etki grafiği ve etkileşim grafiği .....                 | 71 |
| <b>Şekil 5.31.</b> $\text{TiO}_2$ miktarı ve motor yüküne bağlı olarak ÖET değişimi için 3d grafiği ve Karşıtlık grafiği.....             | 72 |
| <b>Şekil 5.32.</b> $\text{TiO}_2$ miktarı ve motor yüküne bağlı ÖET değişimi için etki grafiği ve etkileşim grafiği .....                 | 72 |
| <b>Şekil 5.33.</b> $\text{TiO}_2$ miktarı ve motor yüküne bağlı olarak EGS değişimi için 3d grafiği ve Karşıtlık grafiği.....             | 73 |
| <b>Şekil 5.34.</b> $\text{TiO}_2$ miktarı ve motor yüküne bağlı EGS değişimi için etki grafiği ve etkileşim grafiği .....                 | 73 |
| <b>Şekil 5.35.</b> $\text{TiO}_2$ miktarı ve motor yüküne bağlı olarak CO değişimi için 3d grafiği ve Karşıtlık grafiği.....              | 74 |
| <b>Şekil 5.36.</b> $\text{TiO}_2$ miktarı ve motor yüküne bağlı CO değişimi için etki grafiği ve etkileşim grafiği .....                  | 74 |
| <b>Şekil 5.37.</b> $\text{TiO}_2$ miktarı ve motor yüküne bağlı olarak $\text{NO}_x$ değişimi için 3d grafiği ve Karşıtlık grafiği.....   | 75 |
| <b>Şekil 5.38.</b> $\text{TiO}_2$ miktarı ve motor yüküne bağlı $\text{NO}_x$ değişimi için etki grafiği ve etkileşim grafiği .....       | 76 |
| <b>Şekil 5.39.</b> $\text{TiO}_2$ miktarı ve motor yüküne bağlı olarak HC değişimi için 3d grafiği ve Karşıtlık grafiği.....              | 77 |
| <b>Şekil 5.40.</b> $\text{TiO}_2$ miktarı ve motor yüküne bağlı HC değişimi için etki grafiği ve etkileşim grafiği .....                  | 77 |
| <b>Şekil 5.41.</b> $\text{TiO}_2$ miktarı ve motor yüküne bağlı olarak duman koyuluğu değişimi için 3d grafiği ve Karşıtlık grafiği ..... | 78 |
| <b>Şekil 5.42.</b> $\text{TiO}_2$ miktarı ve motor yüküne bağlı duman koyuluğu değişimi için etki grafiği ve etkileşim grafiği.....       | 78 |
| <b>Şekil 5.43.</b> Optimizasyon-a (tüm yanıtlar) için yapılan optimizasyon sonuçları .....                                                | 80 |
| <b>Şekil 5.44.</b> Optimizasyon-b (sadece emisyon) için yapılan optimizasyon sonuçları .....                                              | 81 |
| <b>Şekil 5.45.</b> Optimizasyon-c (sadece performans) için yapılan optimizasyon sonuçları .....                                           | 82 |
| <b>Şekil 5.46.</b> Optimizasyon-d (performans öncelikli) için yapılan optimizasyon sonuçları .....                                        | 83 |
| <b>Şekil 5.47.</b> Optimizasyon-d (emisyon öncelikli) için yapılan optimizasyon sonuçları ..                                              | 84 |
| <b>Şekil 5.48.</b> EV (%) değerlerine ait optimum sonuçlar ile deneysel sonuçlar grafiği .....                                            | 88 |
| <b>Şekil 5.49.</b> ÖYT (kg/kWh) değerlerine ait optimum sonuçlar ile deneysel sonuçlar grafiği.....                                       | 88 |
| <b>Şekil 5.50.</b> ÖET (MJ/kWh) değerlerine ait optimum sonuçlar ile deneysel sonuçlar grafiği.....                                       | 88 |
| <b>Şekil 5.51.</b> EGS ( $^{\circ}\text{C}$ ) değerlerine ait optimum sonuçlar ile deneysel sonuçlar grafiği ..                           | 89 |
| <b>Şekil 5.52.</b> CO (%) değerlerine ait optimum sonuçlar ile deneysel sonuçlar grafiği .....                                            | 89 |
| <b>Şekil 5.53.</b> $\text{No}_x$ (ppm) değerlerine ait optimum sonuçlar ile deneysel sonuçlar grafiği ..                                  | 89 |
| <b>Şekil 5.54.</b> HC (ppm) değerlerine ait optimum sonuçlar ile deneysel sonuçlar grafiği ..                                             | 90 |
| <b>Şekil 5.55.</b> Duman ( $\text{m}^{-1}$ ) değerlerine ait optimum sonuçlar ile deneysel sonuçlar grafiği .....                         | 90 |
| <b>Şekil 5.56.</b> Optimum sonuçlar ile deneysel sonuçlar arasındaki hata oranı (%) .....                                                 | 91 |

## SİMGELER VE KISALTMALAR

### Simgeler

|                                |                    |
|--------------------------------|--------------------|
| NO <sub>x</sub>                | : Azot oksitler    |
| CO                             | : Karbonmonoksit   |
| CO <sub>2</sub>                | : Karbondioksit    |
| HC                             | : Hidrokarbon      |
| TiO <sub>2</sub>               | : Titanyum Dioksit |
| Cu                             | : Bakır            |
| Ag                             | : Gümüş            |
| Au                             | : Altın            |
| B                              | : Bor              |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | : Alüminyum Oksit  |
| CO <sub>3</sub> O              | : Kobalt Oksit     |
| CeO <sub>2</sub>               | : Seryum Oksit     |
| ZnO                            | : Çinko Oksit      |
| CuO                            | : Bakır Oksit      |

### Kısaltmalar

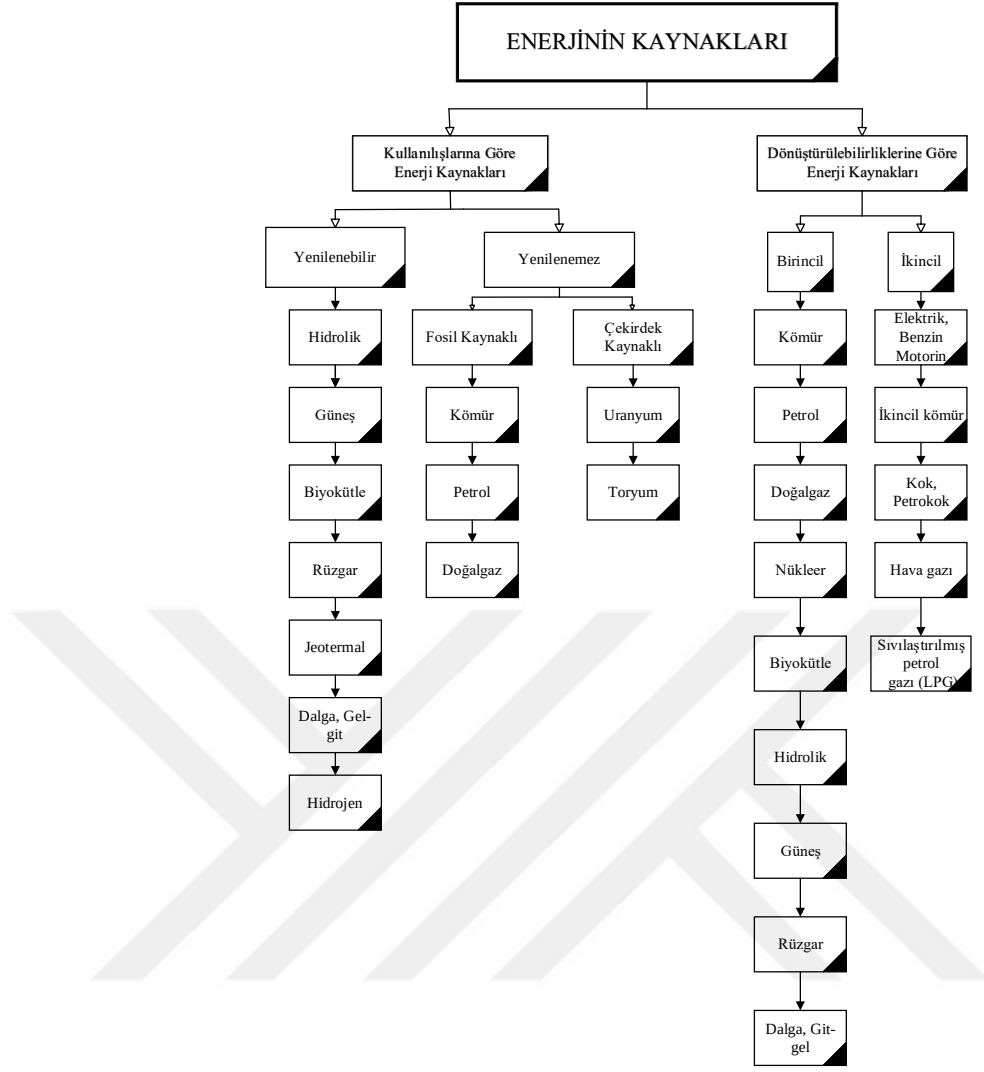
|        |                                                              |
|--------|--------------------------------------------------------------|
| ASTM   | : Amerikan test ve materyalleri birliği                      |
| OEB    | : Ortalama efektif basınç                                    |
| FÖET   | : Fren özgül enerji tüketimi                                 |
| FÖYT   | : Fren özgül yakıt tüketimi                                  |
| EV     | : Efektif verim                                              |
| EG     | : Egzoz gaz sıcaklığı                                        |
| D      | : Eurodizel test yakıtı                                      |
| DTi25  | : (D + 25 ppm TiO <sub>2</sub> katkı maddesi ilaveli yakıt)  |
| DTi50  | : (D + 50 ppm TiO <sub>2</sub> katkı maddesi ilaveli yakıt)  |
| DTi75  | : (D + 75 ppm TiO <sub>2</sub> katkı maddesi ilaveli yakıt)  |
| DTi100 | : (D + 100 ppm TiO <sub>2</sub> katkı maddesi ilaveli yakıt) |
| HFK    | : Hava fazlalık katsayısı                                    |
| MAK    | : Maksimum Atm. Konsantrasyonu                               |
| MİK    | : Maksimum İşyeri Konsantrasyonu                             |
| DTK    | : Doğrudan Teh. Konsantrasyonu                               |
| KMA    | : Krank mili açısı                                           |

## 1. GİRİŞ

Teknolojideki gelişmeler, sanayileşme ve küresel nüfusun büyümesi nedeniyle enerji talebi hızla artmaktadır. Üretim sürecinde temel girdi olan enerji, toplumlardaki yaşam standardının yükseltilmesi için temel bir bileşendir ve günlük hayatın hemen hemen tüm alanlarında uygulama bulur (Erdem ve Kadir, 2015). Artan enerji talebi, azalan petrol rezervleri, petrol fiyatlarındaki dalgalanma ve özellikle fosil yakıtların kullanımına atfedilebilen hava kirliliğine ilişkin endişelerin bir sonucu olarak araştırmacıların alternatif, sürdürülebilir ve çevre dostu enerji kaynaklarına olan ilgisi sürekli artmaktadır (Yeşilyurt 2020).

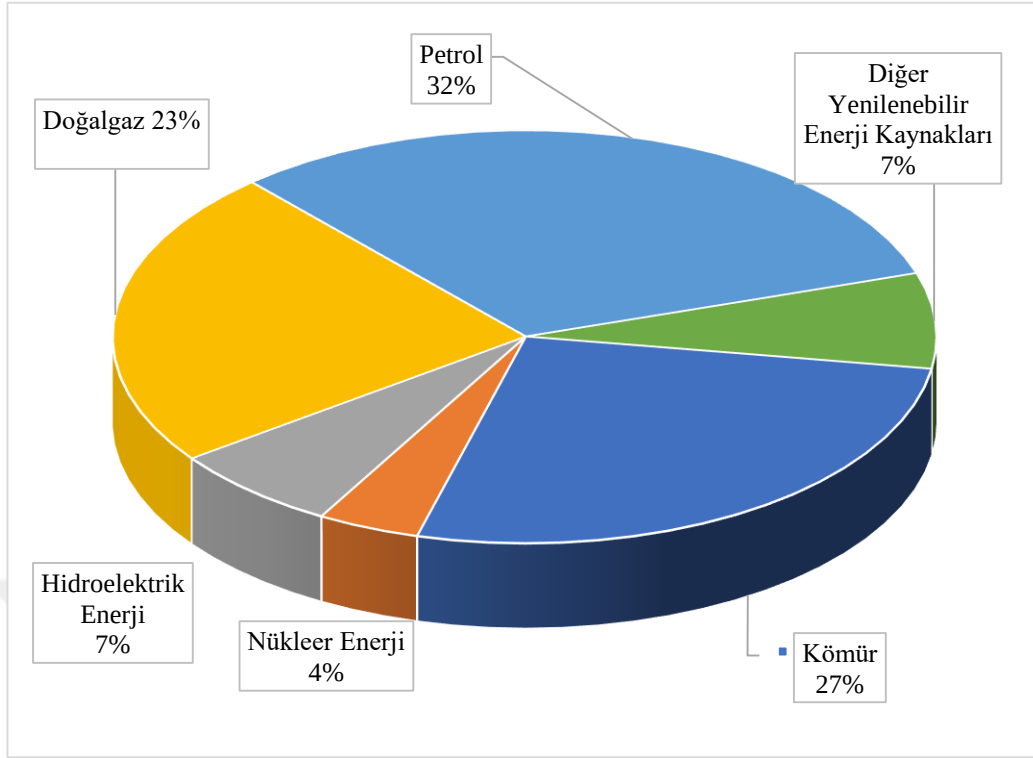
21.yüzyılın başlarından itibaren devam eden sınırlı enerji kaynakları, ülkeler ve bireyler düzeyinde artan enerji maliyetlerine çözüm bulunması gereken en önemli sorun olarak öne çıkmaktadır. Bu doğrultuda, küresel çapta hükümetler ve devletler enerji verimliliği yoluyla maliyetleri azaltmayı amaçlamakta olup, Avrupa'nın 2050 yılına kadar karbon nötr bir kıta olma hedefi de bu kıstaslar arasında yer almaktadır. (Fetting 2020).

Enerji kaynakları genellikle kullanım alanlarına ve dönüştürülebilirlik özelliklerine göre kategorize edilmektedir. Kullanım alanlarına göre enerji kaynakları yenilenebilir ve yenilenemez olarak sınıflandırılırken, dönüştürülebilirlik açısından birincil veya ikincil enerji kaynakları olarak ayrılmaktadır. Şekil 1.1'de bu ayrım daha detaylı olarak gösterilmektedir (Erdem ve Kadir 2015).



**Şekil 1.1.** Enerji kaynaklarının sınıflandırılması (Erdem ve Kadir 2015)

Dünyada tüketilen enerjileri çoğunlukla birincil enerji kaynakları oluşturmaktadır. 2022 yılı baz alındığında tüketilen enerji 604,04 Mtep (milyon ton eşdeğer petrol) olarak gerçekleşmiştir. Şekil 1.2’de tüketilen enerjilerin kaynaklara göre dağılımı gösterilmiştir. (Anonim t.y.-a)



**Şekil 1.2.** 2022 Yılında Dünya Dünyada Tüketilen Birincil Enerji Kaynaklarının Dağılımı (Anonim t.y.-a)

Şekilde görülen, dünyada kullanılan birincil enerji dağılımı sırası ile, petrol (%32), kömür (%27), doğalgaz (%23), hidroelektrik enerji (%7), diğer yenilenebilir enerji kaynakları (%7) ve nükleer enerji (%4) olduğu görülmektedir (Anonim t.y.-a).

Genel olarak çoğu ülke için ana enerji kaynağı olarak fosil yakıtların kullanılması, küresel ısınmaya, hava kirliliğine ve çeşitli olumsuz çevresel etkilere neden olmuştur. Hava kirliliği birçok sağlık sorununa neden olarak sosyal ve ekonomik olumsuz etkilere neden olmaktadır. (Martins vd. 2019). Dizel motorlar, ciddi çevresel kirleticiler arasında yer almalarına rağmen, hem karayolu hem de arazi taşımacılığında vazgeçilmez bir rol üstlenmektedir. Çeşitli kirleticiler içinde özellikle partikül madde (PM), karbonlu türler ve organik bileşikler endişe kaynağıdır. Bu maddeler, küçük boyutları nedeniyle solunum sistemine derinlemesine nüfuz edebilmekte ve kan dolaşımına girebilmektedir. Sonuç olarak, bu zararlı maddelere uzun süre maruz kalmak, çeşitli kardiyovasküler ve solunum yolu rahatsızlıklarının ortaya çıkmasına neden olabilmektedir. (Yusuf, Inambao, ve Ampah 2022).

Sera gazı emisyonlarının azaltılması ve fosil yakıt rezervlerinin hızla azaltılmasına yönelik uluslararası "Kyoto Protokolü" kararına dayanarak temiz,



ekonomik ve fosil yakıtlara alternatif olabilecek yeni yakıtlar ve yakıt teknolojileri üzerine çalışmalar hızlanmaktadır (Uslu, Simsek, ve Simsek 2023).

Birçok çalışma, nanopartiküllerin mikron boyutundaki muadillerine kıyasla yakıt katkısı olarak daha iyi tutuşma ve yanma özelliklerine sahip olduğunu göstermiştir. Bu üstün özellikler, nanopartiküllerin çok daha geniş bir yüzey alanı sağlaması ve bu sayede daha yüksek bir reaksiyon oranına ulaşması ile ilişkilendirilmektedir. Nanopartiküller, küçük boyutları ve yüksek yüzey-hacim oranları sayesinde daha hızlı yanma ve daha verimli enerji salınımı sunmaktadır. Bu özellikler, nanopartiküllerin enerji verimliliğini artırarak daha temiz ve etkili bir yanma süreci sağladığına işaret etmektedir. Dolayısıyla, nanopartiküller, yanma teknolojilerinde enerji tasarrufu, karbon salınımının azaltılması ve çevresel etkiyi en aza indirme gibi hedefler doğrultusunda değerli bir potansiyel taşımaktadır. Nanopartiküllerin sahip olduğu bu avantajlar, özellikle sürdürülebilir enerji çözümlerinin geliştirilmesi ve fosil yakıtların daha verimli kullanımı açısından 21. Yy ilk çeyreğinde önemli bir araştırma konusu olarak öne çıkmaktadır (Ojha ve Karmakar 2018).

### **1.1 Nanopartiküller ve Özellikleri**

Nanomalzemeler Yunanca “nano” kelimesinden türeyerek cüce anlamına gelmektedir. Bu nanomalzemeler yeni bir atom altı yapı oluşturmak için nükleer ve atom altı boyutta malzemelerin değiştirilmesiyle elde edilir. Metrik olarak “nano” terimi, element bileşiminin milyarda bir bölümünü oluşturan küçük bir kısmını ifade eder. 100 nm'nin altındaki boyutlara sahip olan nanomalzemeler, doğal özelliklerinden farklı olağanüstü ve yenilikçi özellikler sergiler (Bidir vd. 2021).

Son zamanlarda, motor performansını artırmak ve emisyonları azaltmak için yakıtlara eklenen maddeler olan nanopartikül katkı maddelerinin kullanımına artan bir ilgi olmuştur. Bu katkı maddeleri, yakıtların özelliklerini iyileştirme potansiyeline sahip oldukları için son derece yenilikçi olarak kabul edilir. Özellikle, nanopartiküllerin motorlara dahil edilmesi, iyileştirilmiş yanma verimliliği ve azaltılmış yakıt tüketimi gibi özellikleri açısından önemli avantajlar göstermiştir (Hoang 2021).

Nanopartikül metaller (Mn, Si, Fe, Cu, Al, Mg, Ag, Au, B, vb.), metalik oksitler ( $Al_2O_3$ ,  $Co_3O_4$ ,  $CeO_2$ ,  $TiO_2$ ,  $ZnO$ ,  $CuO$  vb.) ve metalik kombinasyonlar (Mg-Al, Karbon nanotüpler (CNT) vb.) yakıtın fizyokimyasal özelliklerini ve yakıt performanslarını geliştirmek için yakıt üretiminde ve kullanımında katkı maddesi olarak kullanılır (Sadhik

Basha ve Anand 2011). Bir nanopartikül katkı maddesinin yakıt numunesine dahil edilmesi sonucu yakıtın vizkozitesini azalttığı ve uçuculuk sergileyerek daha çok fayda sağladığı tespit edilmiştir (Yusuf vd. 2022).

Nanopartiküllerin baz alınan yakıtı eklenmesi, tutuşmanın dağılması, emisyonlarda azalma, performansın artırılması ile sonuçlanır. Enjektörlerin tıkanması ve piston yağı segmentlerinin yapışması ile ilgili zorluklar, nano yakıt katkı maddelerinin kalıcı kullanımı için incelenmelidir. Egzozda bulunan nanopartiküllerin analizi, çevre üzerinde herhangi bir zararlı etkiden kaçınmak için dikkatli bir incelemeye tabi tutulmalıdır. Baz alınan yakıtta topaklanmayı önlemek için nano malzemelerin ana sorunları çözümlenmelidir (Gad vd. 2023).

## **1.2 Amaç ve Kapsam**

Bu tez çalışmasının amacı, dizel yakıtlarda yanma verimini artırmak, egzoz emisyonlarını azaltmak ve bu sonuçlar doğrultusunda Titanyum Oksit ( $TiO_2$ ) nanopartikül katkılı yakıtın dizel motorlarda kullanımına yönelik optimum koşulları belirlemektir. Bu amaç doğrultusunda, eurodizel test yakıtlarına çeşitli oranlarda  $TiO_2$  nano partiküller eklenerek farklı yakıt konsantrasyonları oluşturulmuştur. Çalışmanın ilk aşamasında, katkılı yakıtların kimyasal ve termofiziksel özellikleri ölçülmüştür. İkinci aşamada ise deney yakıtlarının emisyon profilleri, motor performansları ve yanma karakteristikleri deneysel yöntemlerle incelenmiştir. Üçüncü ve son aşamada, elde edilen bulgulara dayalı olarak yüzey yanıt yöntemi kullanılarak hem tahmin modelleri geliştirilmiş hem de optimizasyon yapılmış; böylece ideal çalışma parametreleri ve en uygun tahmin modelleri elde edilmiştir.

## **1.3 Nano-Partikül Madde Miktarının Belirlenmesi**

Yaptığımız çalışmada Nano-partikül madde miktar aralığını 25-50-75-100 ppm arasında belirlenmiştir. Burada eurodizel yakıtı eklenen nano partiküllerin miktarı, genellikle çok düşük oranlarda, yani ppm (milyonda bir parça) düzeyinde tutulur. Tipik olarak yapılan çalışmalar, nano partiküllerin miktarını 10-100 ppm arasında tutmanın uygun olduğunu göstermektedir. Bu oran, partiküllerin yanma sürecine olumlu etkilerini ortaya çıkarırken, fazla kullanım durumunda oluşabilecek olumsuz etkileri de sınırlar.

## 2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Fangsuwannarak ve Triratanasirichai (2013) yaptığı çalışmada ticari dizel D (%98 saf dizel + %2 palmiye yağı), B5 palmiye biyodizeli (%95 ticari dizel + %5 palmiye yağı), nano madde titanyum partikülleri ( $TiO_2$ ) ile harmanlama işlemi sonrasında ticari dizel (%99,8 ticari dizel + %0,2  $TiO_2$ ) ve B5 palmiye biyodizeli +  $TiO_2$  (%99,8 B5 + palm biyodizeli + %0,2  $TiO_2$ ) yakıt numuneleri ile motor performansını ve emisyon değerlerini test etmişlerdir. 1700-3000 rpm aralığındaki  $TiO_2$  katkılı yakıtlar, saf dizel ve B5 yakıtına kıyasla motor gücünü %7,78 ve %1,36, motor torkunu %1,01 ve %1,53 oranında arttığını gözlemlemişlerdir. Ayrıca  $TiO_2$  katkılı dizel yakıt, saf dizele kıyasla fren özgül yakıt tüketimini %13,22 oranında azalttığını ortaya koymuşlardır. Böylelikle dizel yakıtta  $TiO_2$  ilavesinin  $NO_x$ , CO ve  $CO_2$  emisyonlarını da azalttığını belirtmişlerdir.

Prabhu ve ark. (2015) yaptıkları çalışmada dizel-biyodizel karışımları için katkı maddesi olarak titanyum dioksit ( $TiO_2$ ) nano partikülünün, tek silindirli dizel yakıtlı motor da farklı yük koşulları ile motor performansını ve emisyon özelliklerinin etkisini araştırmışlardır. 250 ppm ve 500 ppm titanyum oksit nano parçacıkları, %20 biyodizel-dizel karışımı (B20) ile harmanlanır. Bu karışımlar, yüksek hızlı harmanlamaya ve ardından karışımların stabilitesini artıran ultrasonik banyo stabilizasyonuna tabi tutulur. Sonuç olarak, tam yük koşullarında tam yükte B20 test yakıtı ile karşılaştırıldığında, B20 karışımları ile eklenen 250 ppm nano partikül için fren ısı veriminin arttığını ve karbon monoksit, hidrokarbon ve duman emisyonlarının azaldığını, NO emisyonlarının ise marjinal olarak arttığını göstermiştir.

D'Silva ve ark. (2016) titanyum dioksit ve kalsiyum karbonat nanopartiküllerinin bir CI motorunda yakıt için katkı maddesini eklemiş olup bunların motor performansını ve emisyon değerlerini araştırmışlardır. Pongamia pinnata yağının B20 metil esteri içindeki nanopartiküllerin dispersiyonu, bir prob sonikatörü kullanarak gerçekleştirmişler ve fizyokimyasal özelliklerini karakterize etmişlerdir. Elde edilen yakıt numunelerini CI Motor test düzeneğinde test etmişler ve sonuç olarak titanyum dioksit nanoparçacıklarının yakıt katkı maddesi olarak kullanılmasının, sade yakıt ve kalsiyum karbonat nanoyakıt örnekleriyle karşılaştırıldığında gelişmiş performans ve emisyon özelliklerine yol açtığını ortaya koymuşlardır. B20 karışımında  $TiO_2$  nanopartiküllerinin kullanılmasıyla motorun fren ısı verimi, nanokatki maddesi içermeyen yakıt numunesi ile karşılaştırıldığında %2 oranında arttığını gözlemlemişlerdir.  $TiO_2$  nanoyakıtında sade yağa göre BSFC (fren

özgül yakıt tüketimi) değerinde %6'lık bir azalmayı gözlemlemişlerdir. B20'nin  $\text{TiO}_2$  nanopartikülleri ile harmanlanmasının, düz B20'ye kıyasla ortalama %16 daha az duman emisyonuna yol açtığını ortaya koymuşlardır.

Sungur ve ark. (2016) yaptıkları çalışmada dizel yakıtlar için katkı maddesi olarak nanopartiküllerin eklenmesiyle alev borulu bir kazanın yanma performansını ve emisyonları üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Nano-dizel yakıtları, alüminyum oksit (AlO) ve titanyum oksit nanopartikülleri eklenerek hazırlamışlardır. Performans ve emisyon ölçümleri, konut, su soğutmalı, ters alev borulu bir kazanda gerçekleştirilmiştir. 100, 200 ve 300 ppm nanopartiküller içeren nano-dizelin yanma odasındaki sıcaklık dağılımları, yanma performansı ve egzoz gazı emisyonları incelenmiş ve bunlar saf dizel yakıtla karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, nanopartiküllerin eklenmesinin en yüksek sıcaklık bölgelerinin boyutunu azalttığını ve 300 ppm'ye kadar nanopartiküllerin eklenmesiyle termal verimliliği yaklaşık %90.4'ten % 90.9'a biraz artırdığını tespit etmişlerdir. CO emisyonları 300 ppm AlO nanopartikülleri kullanılarak 275'ten 75 ppm'e kadar 200 ppm'e kadar azalmış, 300 ppm TiO nanopartikülleri kullanılarak 275'ten 225 ppm'e 50 ppm'e kadar düşmüştür. Nano dizellerin yaklaşık 47-51 ppm olan NO emisyonlarını önemli ölçüde etkilemediği gözlemlemişlerdi. AlO ve TiO nano katkı maddelerinin sonuçları benzer eğilimler gösterdiğini bildirmişler, ancak AlO nano dizel, TiO nano dizele kıyasla biraz daha iyi motor performansını artırdığı ve daha iyi emisyon değerlerine ulaşıldığını deneysel olarak sonuçlandırmışlardır.

Jeryraj Kumar ve ark. (2016) yaptığı çalışmada tropikal bir meyve olan calophyllum inophyllum seed oil (tamanu çekirdeği yağı) biyodizeline nano yakıt katkı maddelerinden kobalt (II,III) oksit ( $\text{Co}_3\text{O}_4$ ) ve titanyum dioksit ( $\text{TiO}_2$ ) ekleyerek dört yanma zamanlı, tek silindirli, sıkıştırma enjeksiyonlu dizel yakıtlı motordaki performansı ve emisyonu araştırmışlardır. Nano yakıt katkıları hidrotermal proses ile partikül büyüklük aralığı 100 nm'nin altında hazırlanmıştır. Nano yakıt partikülleri (150 mg/l) bir ultrasonikatör ve manyetik karıştırıcı ile biyodizelin içerisine dağıtılmıştır. Deneyde bulunan sonuçlara göre katkı maddeleri, partikül madde (PM), karbon monoksit (CO) ve yanmamış hidrokarbon (UHC) emisyonlarında azalma, nitrojen oksit ( $\text{NO}_x$ ) emisyonunda ise minimum artış elde etmek için en iyi yöntem olarak uygulanmıştır. Katkı maddelerinin biyodizele uygun oranda eklenmesi ile motor da gerçekleşen yanma olayı ve performans özelliklerinin artması gözlenmiştir. Nano katkı maddeleri yakıt tüketimini azaltmakla beraber yanma esnasında ısı verimi artırdığı ve katkı maddelerinin enerjiyi yakıtta aktardığı sonucu elde edilmiştir.

Örs ve ark. (2018) yaptığı çalışmada dizel/biyodizel/n-bütanol karışımlarında  $TiO_2$  (titanyum dioksit) nanopartikül katkısıyla yakıtlanan DICI motorunun performans, yanma ve emisyon özellikleri üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Ayrıca bu katkı maddelerinin tork, güç, yakıt tüketimi parametreleri ile birlikte CO,  $CO_2$ , HC, NO ve duman opaklığı dahil olmak üzere motor üzerindeki etkileri de incelenmiştir.  $TiO_2$  (titanyum dioksit) nanopartiküllerinin eklenmesinin yakıt tüketimini azaltırken motor torku ve motor gücünü arttırdığı bulunmuştur. Ayrıca yanmayı iyileştirdiği ve CO, HC, duman opaklığı emisyonlarını azalttığı sonucuna varılmıştır. N-bütanol ilavesinin, silindir basıncını ve ısı salınım oranını artırarak motor performansını arttırdığı ve  $TiO_2$  (titanyum dioksit) ile birleştirilmesi dışında NO emisyonlarını azalttığı gözlenmiştir. Sonuç olarak biyodizel, n-bütanol ve  $TiO_2$  (titanyum dioksit) katkı maddelerinin kullanımının dizel motorlarda yanma özelliklerini, motor performansını ve egzoz gazı emisyonlarını iyileştirebileceği gösterilmiştir.

Praveen ve ark. (2018) yaptıkları çalışmada Calophyllum Inophyllum (tamanu çekirdeği) biyodizeli, TiO nanokatki maddeleri ve EGR ile harmanlanan bir dizel motorun performans ve emisyon özelliklerini araştırmışlardır. Calophyllum Inophyllum biyodizel karışımı (B20), biyodizelin %20'si ile dizelin %80'inin manyetik karıştırıcı yardımıyla hacimsel olarak karıştırılmasıyla hazırlanmıştır. Ayrıca,  $TiO_2$  nano partiküller 40 ppm' lik bir dozajla B20 yakıt numunesine dağıtılarak B2040TiO olarak adlandırılmıştır. Yapılan deneysel çalışmalarda EGR yöntemi ile B20+%20EGR ve B2040TiO+%20EGR uygulanmıştır. Elde edilen verilere göre performans değerleri fren termal verimliliği B2040TiO ve B2040TiO<sub>2</sub> + %20 EGR yakıtları tam yük durumundaki B20 yakıt örneğine göre sırasıyla %3,1, %2,5 arttığı, B20 + %20 EGR yakıt örneğine göre %1,8 azaldığı görülmüştür. Tam yük durumundaki diğer yakıtlara kıyasla ısı yayma oranı ve silindir basıncı en yüksek değer B2040TiO test yakıtında gözlemlenmiştir. CO emisyonları tam yük durumu hariç diğer yüklerde azaldığı, B2040TiO yakıtı için B20 yakıt örneğine kıyasla %23 oranında azaldığı, B2040TiO ve B20 yakıtları için EGR yöntemi ile yakıtın eksik yanmasından dolayı CO emisyonlarını arttırdığı gözlenmiştir. HC emisyonları tüm yakıt numuneleri için yük arttıkça arttığı gözlenmiştir. TiO ilavesi HC emisyonlarını azalttığı, B2040TiO yakıtı için B20 yakıt örneğine kıyasla HC emisyonlarının %12 oranında azaldığı gözlenmiştir. NO<sub>x</sub> emisyonları TiO ilavesiyle B20 yakıtına kıyasla arttığı, EGR yönteminde yakıtın oksijen konsantrasyonu ve alev sıcaklığı düştüğü için NO<sub>x</sub> emisyonlarının azaldığı gözlenmiştir.

Sarikoç (2019) yaptığı çalışmada biyodizel-bütanol-dizel test yakıtlarına hidrojenin ve titanyum dioksitin katkısı ile motor performansını ve emisyonun etkilerini araştırmıştır. Atık olarak kullanılmayan kızartma yağlarından elde edilen biyodizel yakıt, %20 (hacimce) oranında dizel yakıt ile birleştirmiş ve bu harmanlamaya ilave %5-10 (hacim olarak) bütanol eklemiştir. Üretilen biyodizelin, yoğunluk, akış noktası, bulanıklık noktası, soğuk filtre tıkama noktası, alevlenme noktası, kinematik viskozite, asit parametresi, element analizi, kalorifik değerler ve sağlanan çeşitli oranlar gibi parametreleri kapsayan çok sayıda önemli termo-fiziksel ve kimyasal özellik tanımlamıştır. Yakıt karışımlarını, motorun emme manifoldundan gelen yüksek saflıkta hidrojen gazı ( $H_2$ ) ile zenginleştirmiş, böylece çeşitli motor yüklerinde ve sabit bir motor devrinde deney yakıtlarının performans, yanma ve emisyon özelliklerini tanıtmıştır. Elde edilen çalışmada, üç silindire sahip doğrudan enjeksiyonlu dizel yakıtlı motordaki deney yakıtları için tork değeri, gücü, özgül yakıt tüketimi, termal verimliliği ve yanmanın analiz parametreleri hesaplanmıştır. Bu bağlamda, test karışımlarına ait,  $NO_x$ , CO,  $CO_2$ , HC, ve is bulanıklığı emisyonları üzerindeki etkisi değerlendirilmiştir. Bu bulgular ile, atık kızartılmış yağlardan elde edilen biyodizel yakıtının hidrojen ve bütanol ile farklı oranlarda birleştirilmesinin, deney yakıtına ait termofiziksel özellikleri ve yanma özelliklerini artırdığı, motorun etkinliğini artırdığı ve egzozdan dışarıya atılan emisyon seviyelerini azalttığı gözlenmiştir. Ayrıca,  $TiO_2$  nanopartikülü deney yakıtlarına eklenerek elde edilen veriler hidrojen katkılı yakıtı göre kıyaslanmıştır. Sonuç olarak,  $TiO_2$  nanopartikül katkılı yakıtın motora ait performansı ve egzoz emisyonunu hidrojen katkılı yakıtı göre daha iyi etkilediği, fakat hidrojen katkılı yakıtın duman koyuluğunu  $TiO_2$  katkılı yakıtı göre daha fazla düşürdüğü tespit edilmiştir. (Verma vd. 2023)

Venu ve ark. (2019) yaptıkları çalışmada EGR'nin birleşik etkisi ile palm biyodizelinin (PB-EGR) ve  $TiO_2$  nano katkı maddeleri ile harmanlanmış palmye biyodizelinin (PBN-EGR) yanma, performans ve emisyon özellikleri açısından incelemişlerdir. Araştırmacılar Palm yağını, palm metil esterine dönüştürerek biyoyakıt elde etmişler, elde edilen test yakıtına nanopartikül eklenmesiyle mevcut dizel yakıtlı motorda değişken yük altında (%25, %50, %75 ve %100) yakıt olarak kullanılmasını deneysel verilerle analiz etmişlerdir. Deney yakıtları olarak PB (%30 palm biyodizel+%70 dizel yakıt), PBN (%30 palm biyodizel+%70 dizel yakıt+25 ppm  $TiO_2$ ), PB-EGR (EGR'li PBN), 10EGR-PB (%10 EGR'li PB), 20EGR-PB (%20 EGR'li PB), PBN-EGR (EGR'li PBN), 10EGR-PBN (%10 EGR'li PBN), 20EGR-PBN (%20 EGR'li PBN) olarak belirlemişlerdir. Deneysel çalışma sonucunda palm yağının zengin

potansiyelini ortaya koyarak son derece sürdürülebilir, ekonomik ve dizel motorlarda yenilenebilir yakıt olarak kullanılmasını elde etmişlerdir. PBN-EGR karışımının duman yoğunluğu sırasıyla PB-EGR'ye göre azaldığı gözlenmiştir. %100 yükte PB, PB-10EGR ve PB-20EGR'nin sırası ile duman emisyonları 0,62 BSU, 2,2 BSU ve 2,9 BSU iken PBN, PBN-10EGR ve PBN-20EGR için sırasıyla 0,5 BSU, 1,13 BSU ve 2,37 BSU'dur. Duman opaklığındaki bu marjinal azalma, daha yüksek  $O_2$  içeriğine ve nanopartiküllerin varlığına bağlı olarak artan yanma verimliliğine bağlanabileceği tespit edilmiştir. Azot oksitler ( $NO_x$ ) genel olarak artışla birlikte EGR yüzdeleri sayesinde önemli ölçüde azaldığı ve buna bağlı olarak PB-EGR durumunda, %25 motor yükünde PB-10EGR 208,24 g/kWh verirken, PB-20EGR, 171,56 g/kWh değerini vermiştir. Bu değerlerin saf PB karışımından %17,61 ve %20,78 daha düşük olduğu gözlenmiştir. PBN-EGR' ye göre, PBN-10EGR ve PBN-20EGR, %25 motor yükünde yaklaşık 197,74 g/kWh ve 165,65 g/kWh  $NO_x$  oluşumu yaydığını ve bu değerlerin PBN' den yaklaşık %6,91 ve %22,04 daha düşük olduğunu tespit etmişlerdir. EGR oranının artmasıyla PB karışımının HC emisyonlarında artış olduğu, PB10-EGR için THC emisyonları 8,5 g/kWh (%25 yük) ile 1,76 g/kWh (%100 yük) arasında değiştiği ve PB-20EGR için THC 10,5 g/kWh (%25 yük) ve 3,12 g/kWh (%100 yük) arasında değiştiği gözlemlenmiştir. Çalışmada CO emisyonları PB-EGR' ye göre EGR yüzdelerindeki artışla birlikte taze  $O_2$  değiştirilmesi nedeniyle CO emisyonlarında düşüş gözlenmiş, PB test yakıtı için %25 yükte en yüksek CO oluşumu yaklaşık 0,43 g/kWh, tam yükte sırasıyla PB-10EGR ve PB-20EGR 0,162 g/kWh ve 0,197 g/kWh değerleri rapor edilmiştir. PBN-EGR karışımlarıyla yapılan kıyaslamada, EGR yüzdelerinin artışıyla birlikte %25 yükte CO' da gözlemlenebilir bir düşüş olduğu ve emisyonların PBN yakıtının sırası ile karşılaştırılmasıyla PBN-10EGR ve PBN-20EGR için %46,71 ve %34,95 oranında azalttığı gözlemlenmiştir. Performans ölçümlerinde silindir tepe basıncı PB' de EGR yüzdesinin artmasıyla silindir tepe basıncında bir düşüş olduğu, EGR' siz PB' de epe basınç yaklaşık 65,4 bar iken PB-10EGR ve PB-20EGR için sırasıyla 64,59 bar ve 62,16 bar olduğu gözlenmiştir. PBN-EGR durumunda sonuçlar basıncın zirve noktasında ki PBN ile elde edilen basınç PB karışımından daha yüksek olduğu sadece EGR uygulandığında silindir basıncında marjinal bir azalma meydana gelmiştir. PBN, PBN-10EGR ve PBN-20EGR'nin tam yükte ulaştığı tepe basınç sırasıyla 70,74 bar, 70,08 bar ve 69,49 bar olduğu rapor edilmiştir. Bundan dolayı nano katkı maddelerinin daha yüksek ısıyı muhafaza etme yeteneği gösterilmiştir. Sonuç olarak elde edilen test yakıtlarının kıyaslanması sonucu performans değerlerinde iyileşme, emisyon değerlerinde azalma görüldüğü gözlenmiştir.

Geng ve ark (2021) yaptıkları çalışmada Fischer-Tropsch sentezi ile kömür bazlı bir sıvı yakıt olan F-T dizeline,  $\text{TiO}_2$  nanopartikülleri ve n-oktanol eklenmesi sonucunda altı silindirli dizel bir motorda yanma özellikleri ve egzoz emisyonları üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Farklı konsantrasyonlarda (20 ppm, 50 ppm ve 100 ppm) sahip  $\text{TiO}_2$  nanopartikülleri, optimum  $\text{TiO}_2$  nanopartikül miktarını belirlemek amacıyla F-T dizel ve n-oktanol yakıt karışımları ile harmanlandı. Üç nano-emülsiyon yakıtın fren termal verimliliği (BTE), yanma stabilitesi, sayı konsantrasyonu ve ultra ince parçacık (UFP) emisyonunun boyut dağılımı turbo-şarjlı bir ağır hizmet dizel motorunda araştırılmıştır. Deney yakıtları D100 deney yakıtı (%100 petro-dizel), FT100 deney yakıtı (%100 F-T dizel), T20 deney yakıtı (%90 F-T dizeli + %10 n-oktanol + 20 ppm  $\text{TiO}_2$ ), T50 deney yakıtı (%90 F-T dizeli + %10 n-oktanol + 50 ppm  $\text{TiO}_2$ ), T100 deney yakıtı (%90 F-T dizeli + %10 n-oktanol + 100 ppm  $\text{TiO}_2$ ) olarak belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlarda, F-T dizelin nano emülsiyon-yakıtı T50'nin BTE' sinin, petro-dizel ile kıyaslanmasında sırası ile %0,75 ve %2,26 arttığını bulmuşlardır. Ayrıca, nano-emülsiyon yakıtlar,  $\text{TiO}_2$  nanoparçacıklarının konsantrasyonundaki artışla birlikte tepe silindir basınçlarında daha yüksek döngüsel değişiklikler ve karşılık gelen krank açılarında daha fazla dağılma sergileme yaptığını bulmuşlardır. Petro-dizel ile karşılaştırıldığında, F-T dizelin kurum emisyonu çeşitli yüklerde ortalama %27,32 oranında azalırken, optimum T50'ninki ortalama %43,61 oranında azalmıştır. Ek olarak, T50 test yakıtının UFP'lerinin (ultra ince parçacıkları) sayı konsantrasyonu, F-T dizele kıyasla ortalama %21,2 oranında azaldığı, düşük yüklerde, üç nano emülsiyon yakıt (T20, T50, T100) daha düşük silindir içi sıcaklıkta enjeksiyon öncesi aşamada daha yüksek yakıt viskozitesi nedeniyle UFP'lerin daha büyük geometrik ortalama çaplarını (GMD'ler) ve çekirdeklenme modu partiküllerinin (NMP'ler) daha düşük oranlarını sergilediği, orta ve yüksek yüklerde, nano emülsiyon yakıtlar, daha yüksek sıcaklıklarda mikro patlama ve ikincil atomizasyon nedeniyle daha küçük UFP GMD'leri ve daha yüksek NMP oranları sergilediğini tespit etmişlerdir. Sonuç olarak,  $\text{TiO}_2$  nanoparçacığı ile harmanlanmış kömür bazlı F-T dizel, yüksek verimlilik ve düşük emisyonlu yanma elde etmek için dizel motorlarda alternatif bir yakıt olarak kullanılabilirliği bulunmuştur.

Ağbulut (2022) yaptığı çalışmada titanyum dioksit nanopartikülleri içeren yakıt numunelerini ve parçacık boyutunu içten yanmalı bir motor içindeki etkisini inceledi. Kanola metil ester ve dizel yakıt karışımına 28 nm, 45 nm ve 200 nm ölçülerindeki titanyum dioksit nano maddelerini ekleyerek, 1800 rpm'de çalışan tek silindirli hava soğutmalı dizel motor içindeki parametreleri değerlendirmiş ve yukarıda bahsedilen yakıt



karışımına 100 ppm nanopartiküllerin dahil edilmesiyle testi gerçekleştirmiştir. Yapılan bu çalışmada biyodizelin izolasyonda kullanılmasının spesifik yakıt tüketiminde bir artışa yol açtığını öne sürdü. Bununla birlikte, titanyum dioksit nanoparçacıklarının dahil edilmesi, spesifik yakıt tüketiminde bir azalmaya neden olduğunu gözlemlemiştir. Spesifik olarak, 28 nm nanopartikül kullanımının, spesifik yakıt tüketiminde yaklaşık %17' lik bir azalmaya yol açtığını belirlemiştir.

Razzaq ve ark. (2023) yaptıkları çalışmada atık kızartma yağlarından elde ettikleri biyodizel yakıtı çeşitli konsantrasyonlarda sol-jel yöntemi ile ürettikleri TiO<sub>2</sub> (titanyum dioksit) nanopartikülünü ekleyerek tek silindirli bir CI test motorunda motor performansı ve emisyon değerleri üzerinde deneysel veriler elde etmişlerdir. Motor performansına sahip egzoz emisyonlarını 1150 ile 2150 rpm arasında değişen değişken dönüş hızlarında YYM (yanıt yüzeyi metodolojisi) kullanarak matematiksel olarak modellemesini yapmışlardır. Baz yakıt karışımı olarak B30 (%30 biyodizel + %70 dizel yakıt) yakıtı, 40 ppm, 80 ppm ve 120 ppm TiO<sub>2</sub> (titanyum dioksit) nanopartiküllerinin harmanlanmasıyla yakıt konsantrasyonlarını hazırlamışlardır. Elde edilen deneysel verilere göre BSFC'si (frene özgül yakıt tüketimi) artan motor devri ve nanopartikül konsantrasyonları ile azaldığı buna bağlı olarak B30 + 40 ppm, B30 + 80 ppm ve B30 + 120 ppm karışımları için B30 karışımına göre sırasıyla %11.62, %12.96 ve %13.56 gibi önemli bir iyileşme olduğu, daha yüksek motor devirlerinde BTE'de mükemmel bir artış sergilediği, 2150 rpm'de maksimum BTE'nin (fren termal verimliliği) B30 + 120 ppm, B30 + 80 ppm, B30 + 40 ppm ve B30 ve dizel için sırasıyla %25.90, %25.33, %23.75, %21.23 ve %21.30 olduğu gözlenmiştir. Emisyon değerlerinde minimum CO emisyonları dizel, B30, B30+40 ppm, B30+80 ppm ve B30+120 ppm biyodizel karışımları için 2150 rpm'de sırasıyla 44.30028, 43.34258, 34.3535, 30.30843 ve 25.61486 g/kWh olarak bulunmuştur. Maksimum HC emisyonları dizel, B30, B30 + 40 ppm, B30 + 80 ppm ve B30 + 120 ppm için sırasıyla 1150 rpm'de 0.21791, 0.19764, 0.18894, 0.17254 ve 0.15989 g/kWh olarak gözlenmiştir. En yüksek NO<sub>x</sub> 2150 rpm hızında dizel, B30, B30 + 40 ppm, B30 + 80 ppm ve B30 + 120 ppm için sırasıyla 2.84962, 2.95134, 3.02375, 3.0962 ve 3.16134 emisyonlarını bulmuşlardır. Elde edilen deney verilerine göre B30 test yakıtının dizel ve biyodizel yakıt değerleri ile kıyaslanması sonucu motor performansında iyileşme görüldüğü ve emisyon değerlerinde azalma görüldüğü tespit edilmiştir.

Jain ve ark. (2023) yaptığı çalışmada Eichhornia Crassipes (su sümbülü) olarak bilinen tropikal bölgelere özgü yüzen bir su bitkisinden elde edilen biyodizelin titanyum dioksit nano parçacıkları ile harmanlanması sonucu yeni nano karışimli biyodizelin

kullanımına odaklanmışlardır. 50 ppm, 100 ppm ve 150 ppm titanyum dioksit katkısına sahip üç farklı biyodizel karışımı hazırlanmıştır. 3.5 kW nominal gücünde tek silindirli, dört zamana sahip, atmosferik emişli, su soğutmalı dizel yakıtlı motorda, 200 bar enjeksiyon basıncında, enjeksiyon zamanlaması 23° BTDC (üst ölü noktadan önce) ve farklı yükleme koşulları (%20, %40, %60, %80 ve %100) ile motor performansı, egzoz emisyonu ve yanma değerlendirmesi için test etmişlerdir. Bunun sonucunda yüksek yakıt enjeksiyon basıncında nano parçacık katkısının fren termal verimliliğinin arttığını ve emisyonların azaldığını göstermişlerdir. Tam yükleme koşulu altında 220 bar yakıt enjeksiyon basıncında 150 ppm titanyum dioksit nano harmanlanmış biyodizel bileşimi için dizel moduna kıyasla fren termal verimliliğinde %1,01'lik maksimum iyileşme bulunmuştur. 220 bar'lık aynı yakıt enjeksiyon basıncı ve aynı nano karışımli biyodizel bileşimi için hidrokarbon ve karbonmonoksit emisyonunun %60 yükte minimum olduğu bulunmuştur.

Verma ve ark. (2023) yaptıkları çalışmada bütanol ve TiO<sub>2</sub> nano parçacıklarını elde ettikleri alg (yosun) biyodizeli ile harmanlaması sonrasında dizel motora göre performans ve emisyon özelliklerini araştırmışlardır. Biyodizel (BD) ve fosil dizel (FD) harmanlama karışımına (BM) bütanol ve TiO<sub>2</sub> nano parçacıklarının eklenmesi ile yakıtın kalorifik ve viskoz özelliklerini arttırabilirliğini ortaya koymuşlardır. TiO<sub>2</sub> nano parçacıkları çeşitli dozajlarda (25 ppm, 50 ppm, 75 ppm, 100 ppm) eklenmiş olup test yakıtları B20But30 (FD %50 , BD %20, But %30), B20But30TiO<sub>2</sub> (25 ppm), B20But30TiO<sub>2</sub> (50 ppm), B20But30TiO<sub>2</sub> (75 ppm), B20But30TiO<sub>2</sub> (100 ppm) olarak adlandırılmıştır. Fren özgül yakıt tüketim değeri, fren termal verimlilik değeri ve egzoz gazı sıcaklık değerleri gibi çeşitli performans parametreleri, motor yükü değiştirilerek ve dizel yakıtla karşılaştırılarak tüm test yakıtları için deneysel olarak test edilmiştir. B20But30 karışımına TiO<sub>2</sub> nano katkısının eklenmesi, dizel motor içindeki reaksiyon hızını arttırdığı, bu da egzoz gazında daha düşük CO ve HC emisyonu sağladığına yol açtığı gözlenmiştir. Motor performansı durumları BTE (fren termal verimliliği) ve BSFC (Fren özgül yakıt tüketimi), tam yükleme koşullarında TiO<sub>2</sub> katkısının eklenmesiyle arttığı gözlenmiştir. BM'deki (harmanlanmış yakıt) TiO<sub>2</sub>'nin artması, SO<sub>x</sub> & CO'da azalma ve HC emisyonunda artış olduğu deneysel olarak belirlenmiştir.

Nano partiküllerin performans, yanma analizi ve emisyonlar üzerindeki etkisini anlamak ve YYM (yüzey yanıt metodolojisi) ile optimize etmek için bazı çalışmalar Çizelge 2.1 de gösterilmiştir.

**Çizelge 2.1.** YYM'li bir dizel motorda optimum nanopartikül ilavesinin belirlenmesi

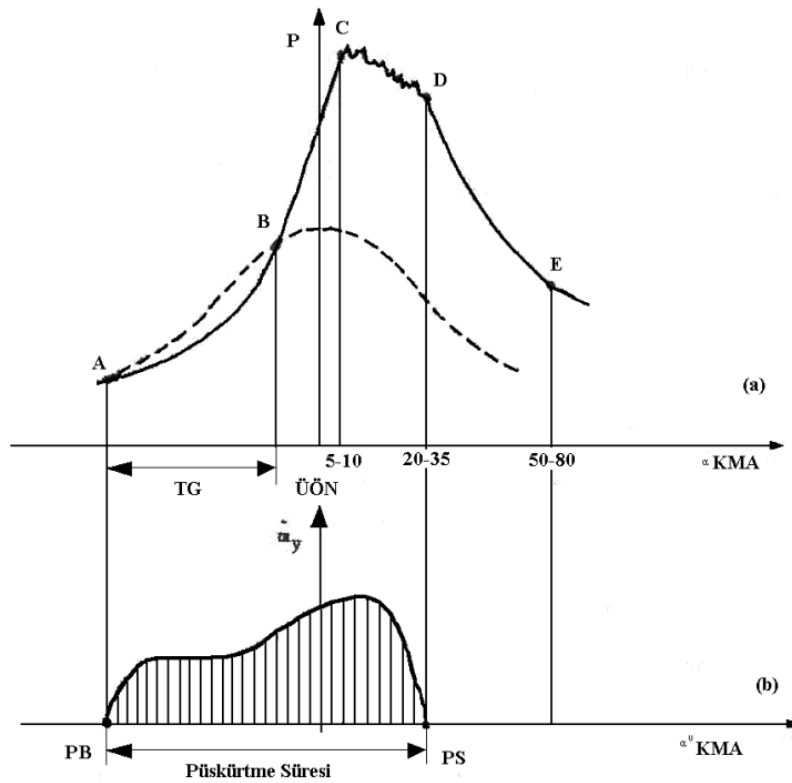
| Yakıt                              | Nanopartikül                         | Giriş Parametreleri                                                                                                            | Optimum Sonuçlar                                                                                                                 | Referans                              |
|------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------|
| Kenevir tohumu Yağı %30+%70 dizel  | Titanyum dioksit (25-50-75-100 ppm)  | Motor Yüğü (1500-2000-2500-3000)<br>Nanopartikül Miktarı                                                                       | 2000 (W)<br>Motor Yüğü<br>75 Ppm TiO <sub>2</sub><br>%95 güven düzeyi                                                            | (Simsek vd. 2021)                     |
| Biyodizel/Etanol                   | Nano-Biyokömür (25-125 Ppm)          | Motor Yüğü<br>Nanopartikül Miktarı                                                                                             | %95 güven düzeyi<br>Optimum motor çalışma parametreleri<br>%2 biyodizel, %6 etanol, 100 ppm nanopartikül ve 2123 rpm motor devri | (Mirbagheri, Ardebili, ve Kiani 2020) |
| Akasya tohum yağı biyodizeli+dizel | TiO <sub>2</sub> (50-100-150-200 pm) | Motor yüğü (%20-%100)<br>Enjeksiyon zamanlaması (17-19-21-23-25)<br>Enjeksiyon basıncı (200-210-220-230-240)<br>Yakıt karışımı | Akasya Biyodizel Hacmi% 40, Dizel % 60, Tio 150 Ppm Nanopartikül 150 Mg / L İzopropanol 20 Ml / L'nin Optimal %95 Güven Düzeyi   | (Saxena, Kumar, ve Saxena 2019)       |
| Atık yemeklik yağ metil ester      | TiO <sub>2</sub> (60-220 ppm)        | Yakıt Enjeksiyon Basıncı (400-600)<br>Atık Kızartma Yağı Biyodizel Oranı<br>Sıkıştırma Oranı (16-20)<br>TiO konsantrasyonu     | %27,7 biyodizel karışımı<br>454 bar enjeksiyon basıncı<br>19,4 sıkıştırma oranı<br>01 ppm TiO olarak rapor edilir                | (Pali vd. 2023)                       |
| Yağ asidi metil ester              | Alümina (40, 80, 120 ve 160 ppm)     | Motor devri<br>Nanopartikül Konsantrasyonu                                                                                     | 160 ppm alümina<br>1000 rpm motor devri                                                                                          | (Ghanbari vd. 2021)                   |

### 3. DİZEL MOTORLAR

#### 3.1. Dizel Motorların Tarihçesi

Dizel motorun patenti, Nikolaus Otto'nun 1876'da benzinli motoru icat etmesinden yaklaşık iki yıl sonra Rudolf Diesel'e verildi. Bu araçlar, çalışma prensiplerinde benzinli motorlarla teorik bir benzerlik paylaşırken, yakıt tipi ve yanma konfigürasyonu açısından farklılık gösterirler. Bu motorların birincil amacı, silindir içindeki yakıtın yanmasından elde edilen kimyasal enerjiyi mekanik enerjiye dönüştürerek kinetik enerjiden yararlanmaktır. Dizel motorun benzinli muadili ile karşılaştırıldığında artan karmaşıklığa ve maliyete rağmen, günümüz pazarındaki artan talebi, satın alınabilirliği ve üstün operasyonel verimliliğinden kaynaklanmaktadır.

#### 3.2. Dizel Yakıtlı Motorlarda Yanma ve Yanma Aşamaları



Şekil 3.1. Dizel yakıtlı motorlarda yanma aşamaları (Ergen 2006)

- Tutuşma gecikmesi bölgesi (A-B),
- Ani yanma bölgesi (B-C),
- Kontrollü yanma bölgesi (C-D),
- Art yanma bölgesi (D-E) (Bakan, 2019).

Dizel yakıtlı motorlardaki yanmanın gerçekleşmesi, yanma odasına yakıtın girmesi ile yanma ürünleri dışarı atıldığı egzoz zamanı başlangıcına kadar geçen süreyi kapsar. Çeşitli fiziksel ve kimyasal olaylar bu süreçte gerçekleşir. Dizel motorlarda yanma; tutuşmanın gecikmesi, kontrolsüz bir yanma, kontrol dahilinde yanma ve art yanma gibi dört farklı aşamadan oluşur. Tutuşma gecikmesi, A noktasında yakıt püskürtmenin başlatılması ile B noktasında ateşlemenin başlaması arasındaki süreyi ifade eder. Daha sonra kontrolsüz yanma B noktasında başladıktan sonra maksimum basınç değerinin üretildiği C noktasına kadar devam eder. C noktasından sonra, silindir içi sıcaklığın zirveye ulaştığı D noktasına kadar kontrollü yanma gerçekleşir. Bu noktada, art yanma başlar ve yanma, sıcaklığın ortam seviyelerine döndüğü E noktasına kadar devam eder (Safgönül vd. 2013a).

### **3.2.1. Tutuşma gecikmesi**

Küçük damlacıklar halinde atomize edilen ve dizel motorlarda basınçlı havaya sokulan yakıt, sıkıştırma nedeniyle basınçlı havadan ısı Emilimi yoluyla buharlaşmaya uğrar. Kısa bir aralıktan sonra, yakıt tutuşmaya uğrar. Yakıtın enjeksiyonu ile alevin ortaya çıkması arasında geçen aralık genellikle tutuşma gecikmesi olarak adlandırılır. Gecikme süresinin herhangi bir uzaması motorun vuruntulu çalışmasına ve operasyonel performansı üzerinde olumsuz bir etkiye sahip olabileceğinden, bu sürenin belirli bir eşik içinde kalması zorunludur. Şekil 3.1'de tamamen doldurulmuş çizgi, krank açısının bir fonksiyonu olarak basınçtaki değişikliği temsil eden eğriye karşılık gelir. Kesik çizgiler ile ifade edilen eğri, yanma olayı gerçekleşmeden sadece havanın sebep olabileceği basıncın krank açısı ile eşdeğer olarak ifade edilen eğridir. Şekile bakıldığında, A ve B noktalarını birbirine bağlayan kesikli çizgi ile düz çizgi arasında bir ayrım olduğu anlaşılabacaktır. Bu eşitsizlik, püskürtülen yakıtın basınçlı havadan nispeten daha soğuk olması gerçeğinden kaynaklanmaktadır. Sonuç olarak, yakıt sıcak havadan ısı çekerek basınçta bir azalmaya neden olur. Ayrıca, tabaka oluşum esnasında, ilk alev çekirdekleri kendiliğinde tutuşarak basınç değeri ve sıcaklık değerinin yükselmesiyle başladığı

görülür. Fiziksel ve kimyasal olarak tutuşma gecikmesi iki türe ayrılabilir. Fiziksel tutuşma gecikmesi, yakıtın küçük parçacıklara parçalanması ve ısıyı emerek buharlaşması için gereken süreyle ilgilidir, dolayısıyla tutuşma gecikmesi olarak adlandırılır. Öte yandan, kimyasal tutuşma gecikmesi, yakıtın buharlaşmasından sonra tutuşma anına kadar ortaya çıkan zaman aralığını belirtir (Safgönül vd., 2013, Borat vd., 1992).

### **3.2.2. Ani yanma**

Tutuşmanın gecikmesi boyunca, yakıtın silindirlere girmesi buharlaşmaya neden olur. Eşzamanlı olarak, damlacıklar daha küçük parçacıklara bölünür ve hava ile karışır. Yanmanın başlamasından sonra, O<sub>2</sub> ile temas eden yakıt hızlı oksidasyona uğrar ve bu da basınçta bir artışa neden olur (B ve C noktaları arasında). Basınçtaki bu ani yükselme, silindir, piston ve piston segmanı arasında çarpışmalara neden olarak bu bileşenlerin hasar görmesine neden olur. Bu olay dizel vuruntusu olarak bilinir. Bu aşamadaki yakıt atomizasyon derecesi, ateşleme sırasında dağılan yakıtı karşılık gelir. Tutuşma gecikmesi sırasında hava-yakıt karışımının miktarı ve durumu, bu süreçte önemli faktörleri temsil eder, çünkü bu aşamadaki basınç artışı tutuşma gecikmesinin süresinden doğrudan etkilenir (Bilginpek, 1991, Safgönül vd., 2013, Yamık, 2002).

### **3.2.3. Kontrollü yanma**

KontROLSÜZ yanmanın bir sonucu olarak elde edilen basınç değeri, yanma sürecinin sürmesine rağmen, pistonun inmesi nedeniyle daha çok yükselemez. Böylelikle, sıcaklıktaki artış devam eder. En yüksek basınç değerine ulaşma anında, yanma, gerekli sıcaklığın elde edilmesi arasında meydana gelen kontrollü yanma ile karakterize edilen bir faza geçer. Bu aşamada silindire enjekte edilen yakıt miktarının yönetimi, sıcaklık ve basınç yükselmesi üzerindeki kontrolün korunmasında etkilidir. Bu aşamadaki buharlaşmanın hızı ve yakıtın buharı hava ile karışım hızı, yanma hızının belirleyicileri olarak işlev görür. Bu bağlamda, püskürtülen yakıt damlacıklarının ortalama çap değeri, silindir içerisindeki hava hareketi ve fazla hava katsayı değeri önemlidir. Dizel yakıtlı motorlarda yakıt buharlaşması ve yakıt tutuşması tekil bir noktada değil, birden çok noktada ortaya çıkar. Yakıt karışımının oluşma hızı da yanma oranını düzenler. Karışımın oluşum hızının ve yanma hızının yanma sıcaklığının yükseldiği bölgelere ÜÖN'ya yakın yerlerde yüksek kalmasını sağlamak gerekir. Bunun yapılmaması, yanmanın sıcaklığın

düştüğü ve genişlemenin devam ettiği bir aşamaya girmesine neden olacaktır. Bu da kurum oluşumuna ve motor verimliliğinde bir azalmaya yol açar (Safgönül vd., 2013)

#### **3.2.4. Art yanma**

Kontrol dahilinde yanma sonrasında egzoz gazının dışarı atılması için egzoz subabının açılmasına kadar geçen sürede gerçekleşen reaksiyonlar art yanma ile adlandırılabilir. Yakıtın enjektörlerden püskürtülmesi kesildikten sonra art yanma gerçekleşir. Enjektörden yakıtın püskürtme işlem durmasından sonra, silindir içindeki kalan yanmamış yakıt ve henüz oksidasyonlarını sonuçlandırmamış yanma yan ürünleri, türbülans ve oksijen miktarına bağlı olarak yanma sürecinde devam eder (Uyumaz 2009).

### **3.3. Dizel Motorlarda Kullanılan Yakıtların Başlıca Özellikleri**

İçten yanmalı motorlarda, yakıttan elde edilen enerjinin termal enerjiye dönüşümü, yakıt ile silindir içindeki hava arasındaki kimyasal bir reaksiyon yoluyla gerçekleşir. Bundan dolayı, yakıt-hava karışımının, kimyasal reaksiyonun gerçekleşmesi için gereken süreden daha az olmayan bir süre boyunca silindir içinde tutulması zorunludur. Bu nedenle motorlar, kısa bir zaman dilimi içinde yanma üretme yeteneğine sahip yakıtlar kullanmalıdır (Haşimoğlu 2005).

#### **3.3.1 EuroDizel yakıt (B7)**

Ham petrol, içten yanmalı motorlarda kullanıma uygun hale getirmek için damıtma işlemini gerektirir. Sonuç olarak, ham petrolün ısıya maruz kalma yoluyla damıtılması, petrol türevleri yakıtlardan olan benzin, makine yağı, ağır yakıt, gaz yağı, jet yakıt, petrol gazları, dizel yakıt ve asfalt gibi akaryakıtlar ortaya çıkar. Geniş anlamda, ham petrolün damıtılması sırasıyla ortalama %30, %20-40, %20, %10-20 benzin, dizel yakıt, ağır yakıt ve ağır yağ verir (Safgönül vd., 2013). Dizel motorlar, üstün yakıt dönüşüm verimliliği, gelişmiş güç çıkışı, artan tork kapasitesi, uzun dayanıklılık ve benzinli motorlara kıyasla yüksek güvenilirlik nedeniyle toplu taşıma, ağır makine, enerji üretimi, tarım ve endüstriyel ekipman alanlarında önemli bir varlıktır. Ek olarak, benzinli motorlar ile karşılaştırıldığında azaltılmış karbon monoksit, hidrokarbon ve karbondioksit emisyonları sergilerler. Dizel motorlarda fosil dizel yakıtın kullanılması hem çevre hem

de insan sağlığı üzerinde zararlı etkiler yaratan yüksek seviyelerde nitrojen oksit (NO<sub>x</sub>) ve kurum emisyonlarına yol açar. Uluslararası Kanseri Araştırma Ajansı (IARC), dizel egzozu insanlar için bir kanserojen olarak sınıflandırdı ve bu tür emisyonlara maruz kalma ile ilgili akciğer kanseri gelişme riskinin arttığını gösteren ikna edici kanıtlar sunmuştur (Kumar ve Saravanan 2016).

### **3.3.1.1. Dizel yakıtlar için fiziksel zellikler**

#### **3.3.1.1.1. Alevlenme ve parlama noktası**

Parlama için belirlenen nokta, ısıtılmış yakıtlar tarafından üretilen buharların herhangi bir harici ateşleme kaynağı olmadan tutuşma yeteneğine sahip olduğu minimum sıcaklıktır. Parlama noktasına göre dizel yakıtlara ilişkin depolama ve yangın nleme yönleri açısından önemli bir yere sahiptir. Tipik olarak, güvenlik amacıyla, yakıtların parlama noktası 65 ila 150°C arasında değişmeli ve 36°C'nin alt eşiğini geçmemesini sağlamalıdır (Ejder 2007). Ateşlenen buharın sönmeden yanmaya devam ettiği sıcaklık “parlama noktası” olarak adlandırılır. Yakıtların yaydığı sıcaklık, yakıtın tutuşmasının potansiyel tehlikesini belirlemek için kullanılır. Çok düşük parlama noktasına sahip yakıtların yakınına açık ateş, kibrit, sigara veya alev getirmek son derece tehlikelidir. Tutuşmanın meydana geldiği sıcaklık, parlama sıcaklığından biraz daha yüksektir ve tipik olarak, bir yakıtın kaynama noktası ne kadar düşükse, alevlenme sıcaklığı o kadar düşük olur. Bu bağlamda, yüksek buharlaşma sıcaklıklarına sahip dizel yakıtların daha güvenli olduğu düşünülmektedir (Ergen 2006).

#### **3.3.1.1.2. Yoğunluk**

Yoğunluk, birim hacim başına yakıtın kütlesinin miktarını ifade eder. Öncelikle karbon ve hidrojenden oluşan yakıtın bileşimi, yakıtın miktarı, parçalanması ve tutuşabilirliği hakkında ilk bilgiler sağlar. Dizel yakıtlı motorlarda, enjektör sistemleri hacim oranlı olarak çalıştığından, yakıt için özgül kütle motora enjekte edilen yakıt miktarını önemli ölçüde etkiler. Ayrıca, yakıttaki hidrojen moleküllerinin sayısındaki bir artış, özgül kütlesinde genel bir azalmaya yol açar (Tillem 2005).



### **3.3.1.1.3. Vizkozite**

Vizkozite sıvıların akmaya karşı göstermiş olduğu direnç olarak tanımlanabilir. Dizel motorlu araçlarda dizel yakıt ile çalışan yakıt sistemlerindeki (yakıt enjektörleri, Yakıt pompası vb.) aşınmaların önlenmesi için yakıtın istenilen değerlerde yağlayıcı özelliğı bulunması gerekmektedir. Bu sebeple yüksek vizkozitenin motor parçalarında hareket kabiliyetini sınırlandırması, düşük vizkozitenin de aşınmayı arttırıcı olacağı düşünülmelidir.

Yakıt bir enjektör veya ince bir kanal aracılığıyla havaya enjekte edildiğinde gerçekleşecek hava kontrolü, yakıtın viskozitesinden fazlaca etkilenir. Bir maddenin viskozitesi arttıkça, yakıtın parçacıklara parçalanması azalır ve sonuç olarak daha büyük yakıt parçacıklarının nüfuz edebilme derinliğinde bir artışa yol açar. Yüksek viskoziteye sahip yakıtlarda yanma engellenir, çünkü nispeten daha soğuk silindir cidarlarına temas etmeden parçacıkları parçalanamazlar. Sonuç olarak, yanma süreci eksik kalır ve egzozda bulunan duman konsantrasyonunda bir artışa yol açar (Haşimoğlu 2005).

### **3.3.1.2. Dizel yakıtların kimyasal özellikleri**

#### **3.3.1.2.1. Setan sayısı**

Dizel yakıtın belirli bir miktarda setana sahip olması tercih edilir. Yakıtın setan sayısı, tutuşma kapasitesini gösterir. Dizel motorlardaki havanın basıncı ve sıcaklığı yükseldiğinde, motora enjekte edilen yakıtın derhal tutuşması avantajlı olarak değerlendirilir. Yakıt püskürtüldükten sonra ateşlemenin anında başlamaması nedeniyle, düşük setan yakıtı silindir içinde birikme eğilimindedir ve daha sonra ani bir yanma gerçekleşir. Bu özel durum dizel motorlarda vuruntuların ortaya çıkmasına neden olur (Şahin, 2022).

#### **3.3.1.2.2. Isıl değer**

Yakıtın içerisinde bulunan kimyasal enerjinin yanma reaksiyonu sonucunda serbest kalması ısı değeri olarak tanımlanabilir. Isıl değer, birim kütle için ve karşılık gelen enerjinin temsili nedeniyle enerji depolama ve tüketimi alanlarında önemli bir öneme

sahiptir. Alt ve üst ısııl değeri olarak iki farklı ısııl değeri belirlenir. İçten yanmalı motorlarda su, yanma sıcaklıklarının doruk noktasında buhar şeklinde kendini gösterir ve alt ısııl değeri olarak kullanılır (Opuz 2022).

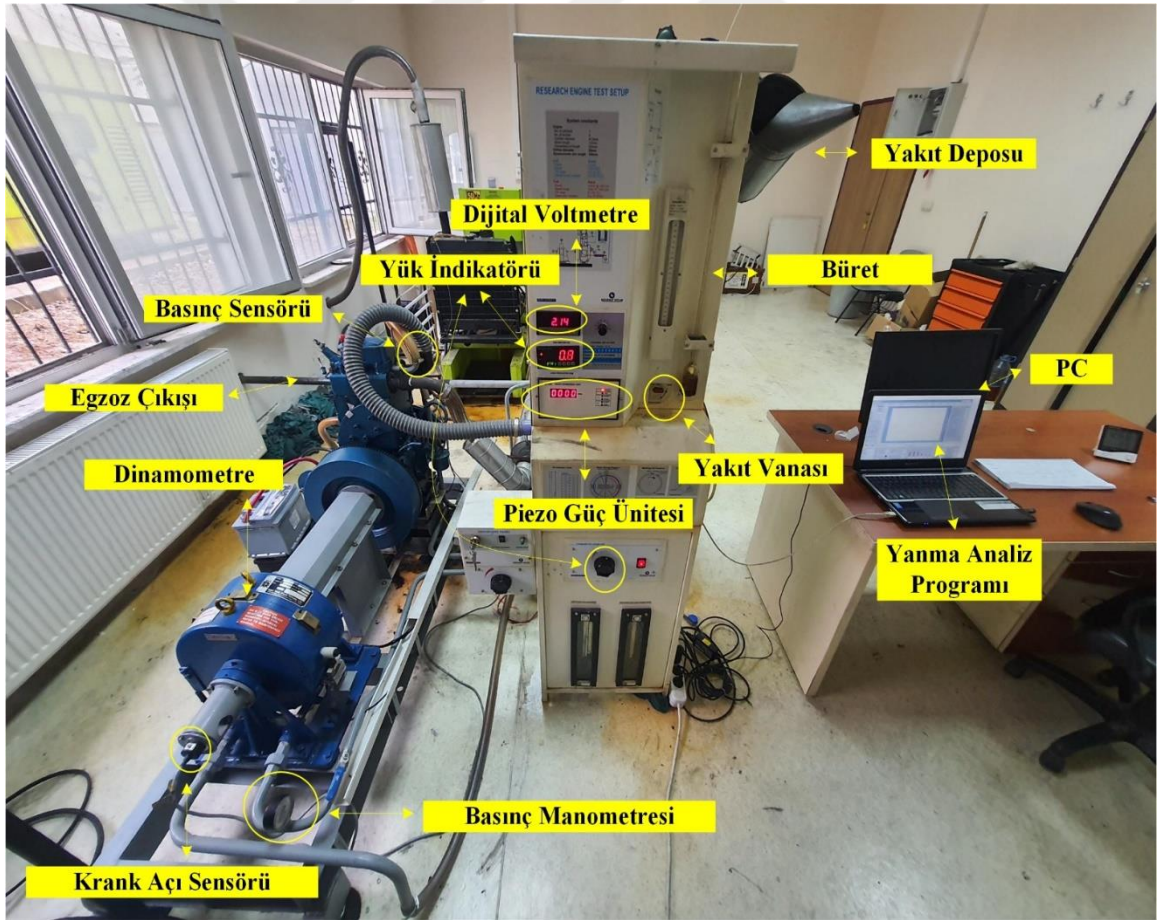
**Çizelge 3.1.** Dizel yakıtların özellikleri (Anonim t.y.-c)

| <b>Yakıt Özelliği</b>        | <b>Birimler</b> | <b>Değer</b>                                                           | <b>Test Metodu</b> |
|------------------------------|-----------------|------------------------------------------------------------------------|--------------------|
| Görünüm                      |                 | Temiz ve berrak, çözünmemiş su ve katı partikül bulunmayan Hidrokarbon | Gözle muayene      |
| Koku                         |                 |                                                                        |                    |
| Kaynama aralığı              | °C              | 160-385                                                                | ASTM D86           |
| Kinematik Viskozite (40 °C)  | cSt             | 1,5-6,0                                                                | ASTM D445          |
| Bağıl Yoğunluk (15 °C), max. | kg/lt           | 0,800-0,890                                                            | ASTM D1298         |
| Parlama noktası (0 °C), min. | °C              | 55                                                                     | ASTM D3828         |

## 4. MATERYAL VE YÖNTEM

### 4.1 Deneyde Kullanılan Dizel Yakıtlı Motorun Teknik Özellikleri

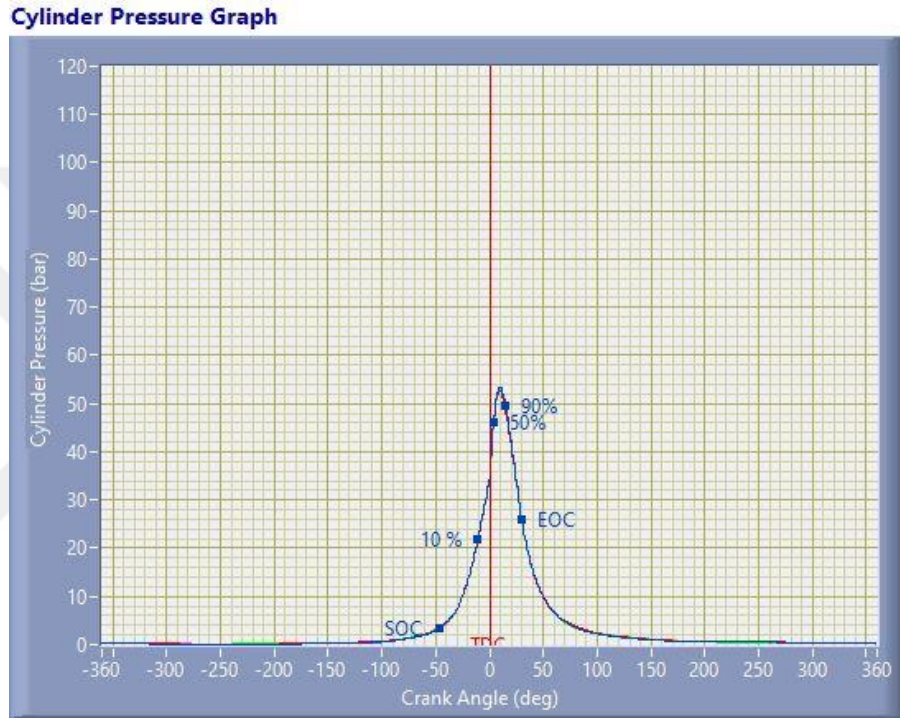
Deney için test verileri Batman Üniversitesi Otomotiv Mühendisliği bölümü atölyesinde bulunan motor üzerinde yapılmıştır. Ölçüm hatalarının etkisini en aza indirmek ve gözlem doğruluğunu artırmak için deneyde kullanılan tüm ölçüm cihazları kalibre edildi. Emisyon ve yanma değerlerinin tespiti için eurodizel yakıtı baz alınmış olup deney DTi25, DTi50, DTi75 ve DTi100 yakıt karışımları ile fren özgül yakıt tüketimi (FÖYT), fren özgül enerji tüketimi (FÖET), efektif verim (EV), egzoz gaz sıcaklığı (EG), HC, CO, NO<sub>x</sub>, duman koyuluğu, silindir basıncı, kümülatif ısı salınımı, net ısı salınımı ve basınç artış oranı değerleri Şekil 4.1’de bulunan motor deney düzeneği üzerinde tespit yapılmış, grafiksel değişimleri gösterilmiştir.



Şekil 4.1. Deney motorunun genel görünümü

#### 4.2 Deney İçin Kullanılan ICEngineSoft\_9.0 Programı

Yanma analizi verileri için ICEngineSoft\_9.0 bilgisayar destekli program kullanılmıştır. Bu uygulama ile motordan alınan veriler bilgisayar ortamına aktarılmaktadır. Şekil 4.2’ de örnek olarak DTi25 (D dizel yakıtının içerisine 25 ppm değerinde  $TiO_2$  katkı maddesi ilaveli yakıt) deney yakıtına ait ICEngineSoft\_9.0 bilgisayar programında ki silindir gaz basıncı ile krank açısı grafiği verilmiştir.



Şekil 4.2. ICEngineSoft\_9.0 programına ait silindir basınç grafiği görüntüsü

#### 4.3 Deney İçin Kullanılan Gaz Analiz Cihazı

Deney için yapılan çalışmalarda CAPELEC markasına ait CAP 3200 model egzoz emisyon cihazından faydalanılmıştır. Bu cihaz sayesinde dizel yakıt baz alınarak DTi25, DTi50, DTi75 ve DTi100 karışımly yakıtlar test edilmiştir. Farklı yüklerde dizel test yakıtı ve diğer karışımly test yakıtları dahil topla yirmi beş test yakıtının CO, HC,  $NO_x$  ve duman egzoz emisyon değerleri analiz edilmiştir. Egzoz gazı emisyon cihazı görünümü Şekil 4.3’de verilmiştir.

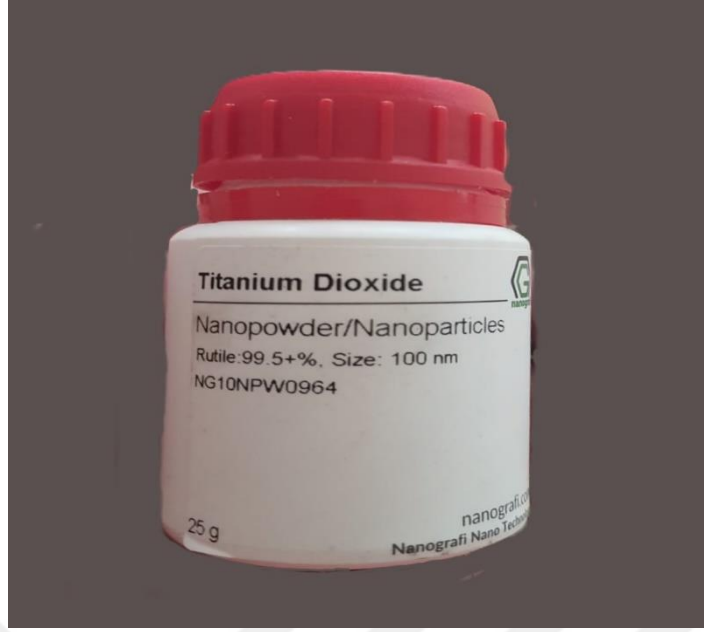


Şekil 4.3. Egzoz emisyon analiz cihazı

#### 4.4. Deneyde Kullanılan $\text{TiO}_2$ Katkısı

Deneyde kullanılan titanyum dioksit ( $\text{TiO}_2$ ) katkı maddesi Nano-grafi Nano teknoloji A.Ş. 'den alınmıştır.  $\text{TiO}_2$ , UV radyasyonunu emme kabiliyeti ve foto-katalitik sterilizasyonu için özellikleri nedeniyle boyalar, plastikler, çimentolar, pencereler, fayanslar ve diğer çeşitli ürünler gibi çeşitli malzemelerde kullanılmaktadır. Ayrıca,  $\text{TiO}_2$  parçacıkları ışık altındaki reaksiyonları katalize etme kabiliyetine sahiptir, böylece onları atık sularda bulunan organik bileşiklerin ayrışması için faydalı hale getirir. Bazı durumlarda,  $\text{TiO}_2$  nanopartiküller silika veya alümina ile kaplanır veya belirli uygulamalara hitap etmek için başka bir metal ile birleştirilir. (Anonim t.y.-b) . Şekil 4.4' de deneyde kullanılan  $\text{TiO}_2$  katkı maddesi görülmektedir.





**Şekil 4.4.**  $\text{TiO}_2$  katkı maddesi

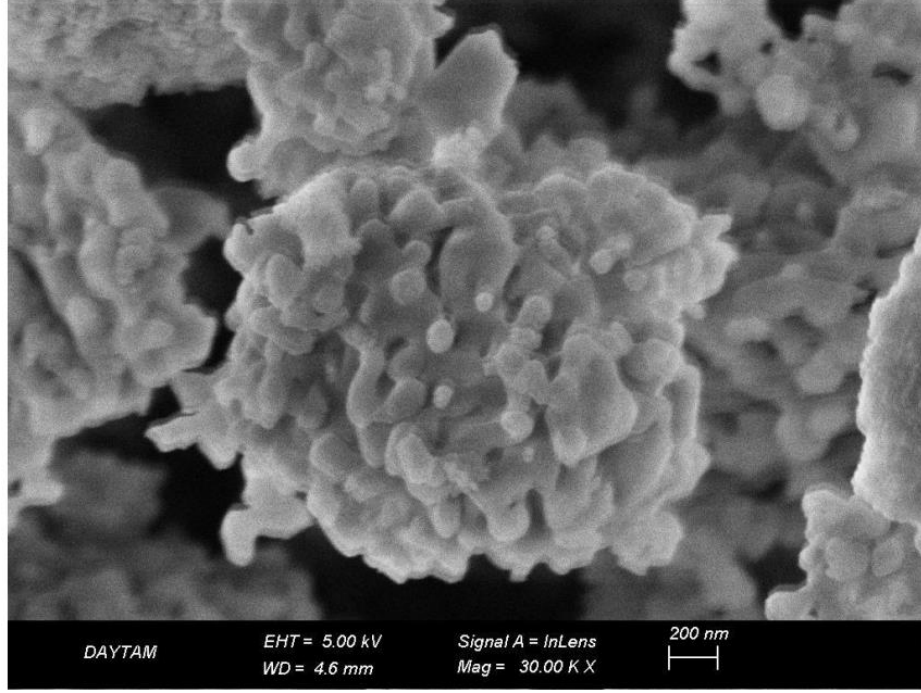
#### 4.4.1. Deneyde kullanılan $\text{TiO}_2$ katkısının teknik özellikleri ve sem görüntüsü

Deneyde kullanılan titanyum dioksit nanopartikül maddesi 100 nm boyutunda olup %99,5 saflık derecesine sahiptir. Çizelge 4.1’ de deneyde kullanılan titanyum dioksit ( $\text{TiO}_2$ ) katkı maddesine ait teknik özellik verilmiştir.

**Çizelge 4.1.**  $\text{TiO}_2$  katkı maddesi teknik özellikleri

| Kristal Form           | Açıklama             |
|------------------------|----------------------|
| Dış görünüş            | İnce beyaz toz       |
| $\text{TiO}_2$ içeriği | 99.5% min            |
| Tane büyüklüğü (nm)    | 100-200 nm           |
| Yüzey alanı            | 5-15 $\text{m}^2$ /g |
| Fe içeriği             | 0.1% max             |
| İçerik olarak          | 20 ppm mac           |

Şekil 4.5’ de deneyde kullanılan titanyum dioksit ( $\text{TiO}_2$ ) katkı maddesine ait SEM görüntüsü verilmiştir.



Şekil 4.5. TiO<sub>2</sub> katkı maddesi SEM görüntüsü

Görüntüdeki partiküller, düzensiz bir yapıya sahip olup yuvarlak çıkıntılar ve yüzey pürüzlülüğü göstermektedir. Bu tür yapılar genellikle amorf (şekilsiz) veya kristalimsi özellikler gösterebilir; ancak kesin tanımlama yapmak için ek bilgiye veya analizlere ihtiyaç vardır.

Bu tür SEM görüntüleri genellikle nanomalzemelerin yüzey yapısını, morfolojisini ve parçacık boyutunu değerlendirmek için kullanılır. Ölçek çubuğu 200 nanometre olduğundan, görüntüdeki partiküllerin nano boyutta olduğu söylenebilir. Ayrıca, görüntüdeki parçacıkların yüzeyinde gözlemlenen çıkıntılar, partiküllerin gözenekli veya yüksek yüzey alanına sahip olduğunu düşündürebilir. Bu özellikler, kataliz, enerji depolama veya adsorpsiyon gibi uygulamalarda kullanılabilecek yapılar için tipiktir.

#### 4.5 Deneyde Kullanılan Yakıtların Hazırlanması

Deney için yakıt numuneleri Batman Üniversitesi Otomotiv Mühendisliği Bölümü atölyesinde hazırlanmıştır. Deneyde kullanılan yakıt karışımlarının egzoz emisyon, yanma ve performans değerleri için D eurodizel test yakıtı baz alınmıştır.

**Çizelge 4.2.** Test için kullanılan yakıt numuneleri

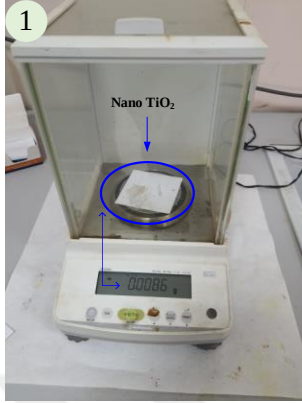
| Yakıt ismi | Açıklama                                                                                     |
|------------|----------------------------------------------------------------------------------------------|
| D          | %100 Eurodizel test yakıtı                                                                   |
| DTi25      | D Eurodizel yakıtın içerisine 25 ppm değerinde TiO <sub>2</sub> katkı maddesi ilaveli yakıt  |
| DTi50      | D Eurodizel yakıtın içerisine 50 ppm değerinde TiO <sub>2</sub> katkı maddesi ilaveli yakıt  |
| DTi75      | D Eurodizel yakıtın içerisine 75 ppm değerinde TiO <sub>2</sub> katkı maddesi ilaveli yakıt  |
| DTi100     | D Eurodizel yakıtın içerisine 100 ppm değerinde TiO <sub>2</sub> katkı maddesi ilaveli yakıt |

Euro dizel yakıtlarına Şekil 4.6 (A)' da gösterilen Shimadzu ATX224 analitik hassas terazide TiO<sub>2</sub> katkısı 25 ppm, 50 ppm, 75 ppm ve 100 ppm konsantrasyon oranlarında hacimsel olarak tartılmıştır.

Nanopartikül TiO<sub>2</sub>'nin 100 ppm için hacimsel ölçümü 0,0086 gr/L olarak belirlenmiştir. Ölçümü yapılan TiO<sub>2</sub> nano maddeler Şekil 4.6 (B)' de gösterilen DLAB MS-H-PRO ısıtıcılı manyetik karıştırıcıda 60 dakika boyunca 800 rpm'de karıştırılmıştır. Test yakıtlarının Şekil 4.6 (C)' de gösterilen ISOLAB marka Ultrasonik banyo ile 40 kHz-60 dakika nanopartiküllerin yakıt içerisinde homojen olarak karıştırılması sağlanmıştır.



**(a) Hassas Terazi**  
**TiO<sub>2</sub> Nanopartikül**  
**madde miktarının**  
**ölçülmesi**  
**25-100 ppm**



**(b) Manyetik Karıştırıcı**  
**800 rpm**  
**60 dakika**

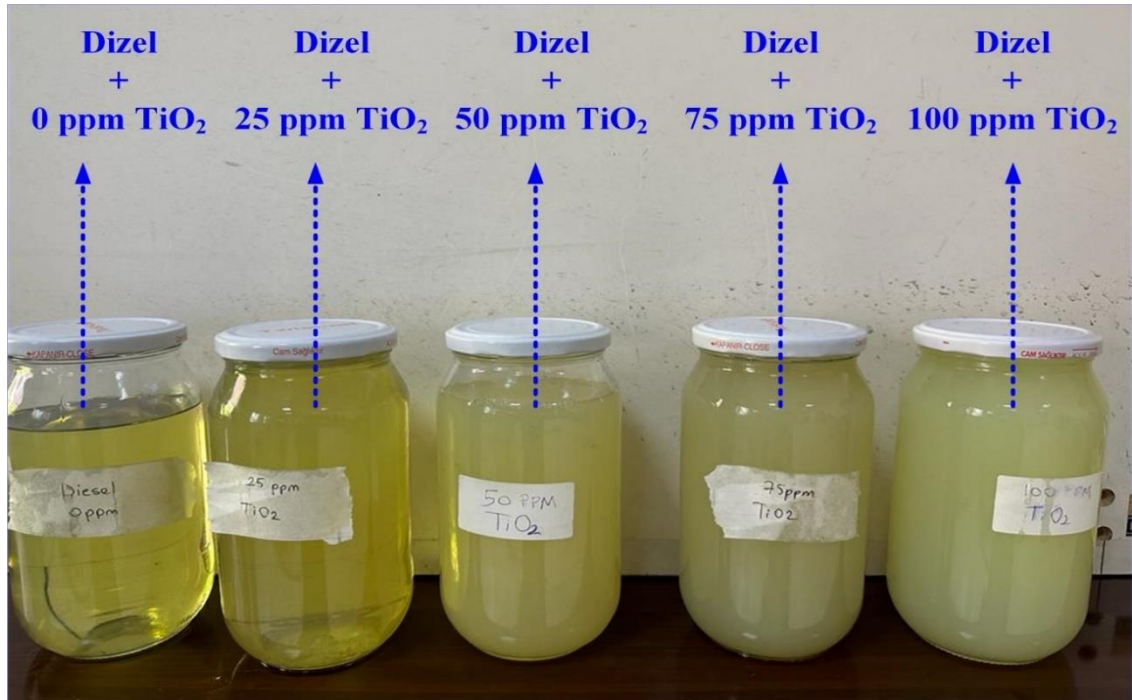


**(c) Ultrasonik Banyo**  
**40 kHz**  
**60 dakika**



**Şekil 4.6.** Hassas terazi(A) Manyetik karıştırıcı(B) Ultrasonik banyo (C)

Elde edilen farklı yakıt konsantrasyonları Çizelge 4.2’de verilmiş olup hazırlanan yakıtlar Şekil 4.7’de gösterilmiştir. Çizelge 4.3’de test yakıtlarına ait özellikler verilmiştir.



**Şekil 4.7.** Dizel yakıtı eklenen TiO<sub>2</sub> katkı maddeli deney yakıtları (D, DTi25, DTi50, DTi75 ve DTi100)

Yaptığımız çalışmada Nano-partikül madde miktar aralığını 25-50-75-100 ppm arasında belirlenmiştir. Burada eurodizel yakıta eklenen nano partiküllerin miktarı, genellikle çok düşük oranlarda, yani ppm (milyonda bir parça) düzeyinde tutulur. Yapılan araştırmalar, nano partiküllerin miktarının 10-100 ppm arasında tutulmasının uygun olduğunu göstermektedir. Bu oran, partiküllerin yanma sürecine olumlu etkiler sağlarken, fazla kullanım durumunda oluşabilecek olumsuz etkilerin de önüne geçer. Nano partiküllerin ideal seviyede kullanımı, yanma sürecini iyileştirerek motor performansını artırabilir, emisyonları azaltabilir ve yakıt verimliliğine katkıda bulunabilir. Ancak, bu oranın üzerine çıkıldığında bazı olumsuz etkiler ortaya çıkabilir. Örneğin, partiküllerin aşırı kullanımı motordaki yakıt filtresinin tıkanmasına yol açabilir, bu da yakıt akışında düzensizliklere neden olur. Ayrıca, nano partiküllerin yoğunluğu nedeniyle kinematik viskozite artabilir; bu durumda, yakıtın enjektörden tam olarak püskürtülmesi zorlaşır. Sonuç olarak, yakıtın yanma odasında tam verimli bir şekilde yanması sağlanamaz ve motorun performansı düşer. Bu nedenle, nano partiküllerin kontrollü bir şekilde ve önerilen miktarda kullanımı, motor sistemlerinin uzun ömürlü olmasını ve optimum seviyede çalışmasını sağlamak için önemlidir.

**Çizelge 4.3. Test yakıtlarının özellikleri**

| <b>Fiziksel Özellikler</b>           | <b>D</b><br>Örnek 1 | <b>DTi25</b><br>Örnek 2 | <b>DTi50</b><br>Örnek 3 | <b>DTi75</b><br>Örnek 4 | <b>DTi100</b><br>Örnek 5 |
|--------------------------------------|---------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|--------------------------|
| Yoğunluk @15 °C<br>kg/m <sup>3</sup> | 833,5               | 834,3                   | 834,7                   | 835,1                   | 835,6                    |
| Kinematik vizkozite<br>(40 °C), cSt  | 3,5                 | 3,5                     | 3,5                     | 3,6                     | 3,6                      |
| Alevlenme noktası,<br>°C             | 60                  | 59                      | 57                      | 57                      | 56                       |
| Setan sayısı                         | 53,8                | 54,3                    | 54,8                    | 55,0                    | 55,2                     |
| Isıl değer (kJ/kg)                   | 42652               | 41743                   | 41334                   | 40812                   | 40372                    |

#### 4.6 Yüzey yanıt metodu (YYM)

YYM, içten yanmalı motorları modellemek ve optimize etmek için seçilen ve ayrıca bir yanıt veya yanıtlar ile bağımsız değişkenler arasındaki ilişkiye dayanan deneysel bir tasarım ve istatistiksel modelleme oluşturma yeteneği nedeniyle çeşitli mühendislik disiplinlerinde tercih edilen bilgisayar tabanlı bir uygulamadır (Yaman,

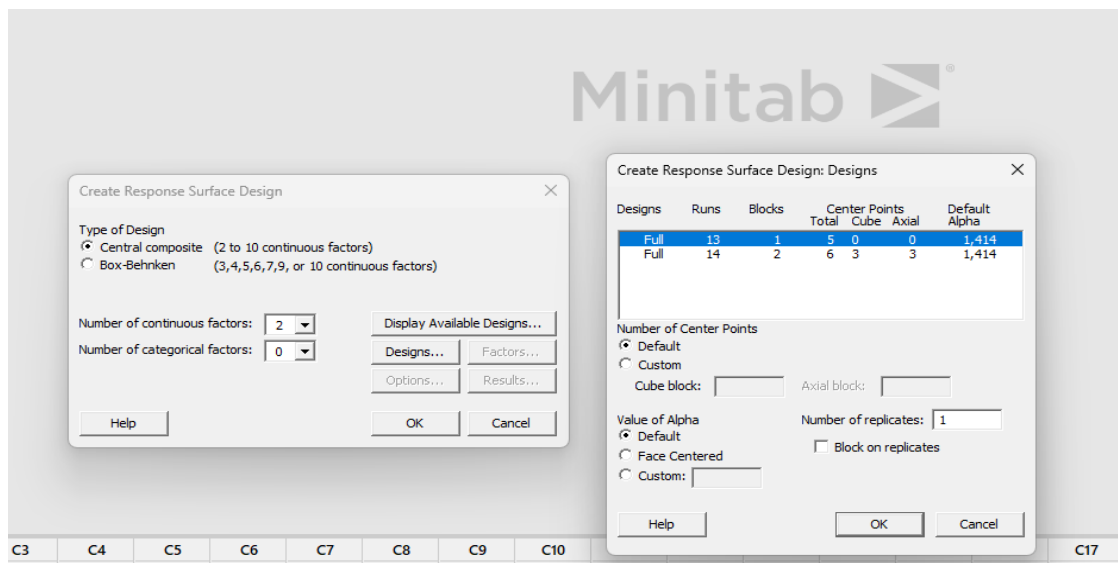
Yeşilyurt, ve Uslu 2021). Yüzey yanıt metodu (YYM), yapılması gereken deneysel çalışmaların miktarını dikkate değer bir şekilde düşürür ve seçilen modelle ilgili olarak, faktör arasında etkiyi belirleyebilir (Ghanbari vd. 2021). Deney sonuçları için, doğru tahmin 2. dereceden bir polinom modeli tepki regresyonu ile bulunur (Yaman vd. 2021). Bu şekilde sistem davranışı, denklem (1) ile kontrol edilir.

$$y = \beta_0 + \sum_i^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \sum_{j \geq i}^k \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (4.1)$$

Denklemden bulunan  $\beta_0$  sabit,  $\beta_i$  ve  $\beta_{ij}$  sırasıyla regresyon katsayısıdır.  $i$  doğrusal katsayı ve  $j$  ikinci dereceden katsayıdır.  $\varepsilon$  rastgele hata,  $k$  modelin sayısı,  $y$  tahmin edilen yanıt,  $x_i$  ve  $x_j$  bireysel değişkenlerdir (Yaman vd. 2021).

Deneysel tasarım için özel olarak tasarlanmış veya daha geniş bir istatistiksel sınıflandırmaya giren çeşitli bilgisayar yazılımı programlarına mevcuttur. Design-Expert (State-Ease Inc.) ve Minitab (Minitab Inc.), yüzey yanıt metodunu (YYM) gerçekleştirmek için kullanılan iki yaygın ticari yazılım uygulamasıdır (Veza vd. 2023). Bu tez çalışmasında YYM modellemesi Minitab programı ile analiz edilmiştir.

Merkezi kompozit tasarım (CCD), ikinci dereceden bir modelin takılması için yaygın olarak kullanılmaktadır ve minimum sayıda deney yapılmasını gerektirir (Singh vd. 2011). Hesaplama merkezi karma tasarım (central composite design) yöntemi ile oluşturulmuştur. Programa ait ekran görüntüsü Şekil 4.8’ de gösterilmiştir.



Şekil 4.8. Minitab programına ait ekran görüntüsü

Deney yakıtlarının test motorunda ilgili girdi parametreleri ile performans, yanma ve emisyon analizi yüzey yanıt metodu (YYM) kullanılarak sonuca ulaşılmıştır. Yüzey yanıt metodu ile minimum sayıda deney ve maksimum değişken aralığı değerlendirilerek sonuçlar optimize edilmektedir. Çizelge 4.4’de girdi parametrelerinde arzu edilen değerler gösterilmektedir. Bu parametrelerde temel amaç motor performansının artması ve emisyon değerlerini azalması olarak nitelendirilebilir. Tez çalışmasında elde edilen deneysel veriler 5 farklı koşul için optimize edilmiştir. Bu koşullar için ağırlık ve önem sırası Çizelge 4.4 ‘de gösterilmektedir.



**Çizelge 4.4.** Optimizasyon kriterleri

| <b>Yanıtlar</b>                     | <b>Hedef</b> | <b>Ağırlık</b> | <b>Önem</b> |
|-------------------------------------|--------------|----------------|-------------|
| Tüm Yanıtlar-Optimizasyon-a         |              |                |             |
| Duman (m-1)                         | Minimum      | 1              | 1           |
| HC (ppm)                            | Minimum      | 1              | 1           |
| Nox (ppm)                           | Minimum      | 1              | 1           |
| CO (%)                              | Minimum      | 1              | 1           |
| EGS (°C)                            | Maksimum     | 1              | 1           |
| ÖET(MJ/kWh)                         | Minimum      | 1              | 1           |
| ÖYT (kg/kWh)                        | Minimum      | 1              | 1           |
| EV (%)                              | Maksimum     | 1              | 1           |
| Sadece Emisyon-Optimizasyon-b       |              |                |             |
| Duman (m-1)                         | Minimum      | 1              | 1           |
| HC (ppm)                            | Minimum      | 1              | 1           |
| Nox (ppm)                           | Minimum      | 1              | 1           |
| CO (%)                              | Minimum      | 1              | 1           |
| Sadece Performans-Optimizasyon c    |              |                |             |
| EGS (°C)                            | Maximum      | 1              | 1           |
| ÖET(MJ/kWh)                         | Minimum      | 1              | 1           |
| ÖYT (kg/kWh)                        | Minimum      | 1              | 1           |
| EV (%)                              | Maximum      | 1              | 1           |
| Performans Öncelikli-Optimizasyon d |              |                |             |
| Duman (m-1)                         | Minimum      | 1              | 2           |
| HC (ppm)                            | Minimum      | 1              | 2           |
| Nox (ppm)                           | Minimum      | 1              | 2           |
| CO (%)                              | Minimum      | 1              | 2           |
| EGS (°C)                            | Maximum      | 1              | 1           |
| ÖET(MJ/kWh)                         | Minimum      | 1              | 1           |
| ÖYT (kg/kWh)                        | Minimum      | 1              | 1           |
| EV (%)                              | Maximum      | 1              | 1           |
| Emisyon Öncelikli-Optimizasyon e    |              |                |             |
| Duman (m-1)                         | Minimum      | 1              | 1           |
| HC (ppm)                            | Minimum      | 1              | 1           |
| Nox (ppm)                           | Minimum      | 1              | 1           |
| CO (%)                              | Minimum      | 1              | 1           |
| EGS (°C)                            | Maximum      | 1              | 2           |
| ÖET(MJ/kWh)                         | Minimum      | 1              | 2           |
| ÖYT (kg/kWh)                        | Minimum      | 1              | 2           |
| EV (%)                              | Maximum      | 1              | 2           |

#### 4.7 Belirsizlik Analizi

Belirsizlik analizi, deneysel prosedür sırasında ortaya çıkan hataların toplanmasını ifade eder. Deneylerde motor çıkış parametreleri, çevre koşulları, ekipman servisi, bakım ve çalışma durumu gibi çeşitli faktörler hatalara ve yanlışlıklara katkıda bulunabilir (Uslu vd. 2023). Her çalışma bir miktar belirsizlik içerir. Bu belirsizlikler esas olarak kalibrasyon, sensörler, gözlemler, test prosedürü ve çevresel koşullardan kaynaklanmaktadır (Devarajan, Nagappan, ve Subbiah 2019). Ek olarak, belirsizlik analizinin bir parçası olarak ortalama bir değer hesaplamak için her deney üç kez tekrarlanmıştır.

Test cihazlarına ait deneysel bulguların hata analizi tespit etmek için Holman tarafında sunulan “belirsizlik analizi” hesaplama yöntemi kullanılmıştır (Holman 2021). Bu yöntemde ölçülmesi gereken büyüklük R ve bu üklüğe etki eden bağımsız değişken sayısı n adet ve bağımsız değişkenler de x olmaktadır. R sonucuna ait toplam her alt bir değere ait belirsizlik  $(U_i = \frac{\partial x_i}{x_i})$  olarak ifade edilirse denklem 2 biçimini almaktadır. Deneysel ölçümlerin belirsizliği Çizelge 4.5’de gösterilmektedir.

$$U_R = \left[ \left( \frac{x_1}{R} \frac{\partial R}{\partial x_1} U_1 \right)^2 + \left( \frac{x_2}{R} \frac{\partial R}{\partial x_2} U_2 \right)^2 + \dots + \left( \frac{x_n}{R} \frac{\partial R}{\partial x_n} U_n \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4.2)$$

**Çizelge 4.5.** Test cihazının ölçüm aralığı, doğruluğu ve belirsizliği ve hesaplanan parametreler

| Parametreler                 | Ölçüm Aralığı | Doğruluk | Belirsizlik (%) |
|------------------------------|---------------|----------|-----------------|
| Fren Gücü                    | 0-3.5 kW      | ±0.3 kW  | ±0.84           |
| Motor Devri                  | 0-1500 rpm    | ±0.1rpm  | ±0.07           |
| Motor Yüğü                   | 0-12 kg       | ± 0.1 kg | ± 0.83          |
| Yakıt tüketiminin kütlesi    | -             | -        | ± 1.55          |
| Egzoz gazı sıcaklığı         | -             | ± 0.1 °C | ± 1.0           |
| Büret sistemi                | -             | ± 0.1 cc | ± 1.0           |
| Dijital saat                 | -             | ± 0.2 s  | ± 0.3           |
| Fren termal verimliliği      | -             | -        | ±1.76           |
| Fren spesifik yakıt tüketimi | -             | -        | ±1.76           |
| Fren özgül enerji tüketimi   | -             | -        | ±1.76           |
| CO                           | 0-10%         | ±0.01 %  | ±0.84           |
| HC                           | 0-20.000 ppm  | ±1.0 ppm | ±0.83           |
| NOx                          | 0-5000 ppm    | ±1.0 ppm | ±0.83           |
| Duman                        | 0-99.9 % vol  | ±0.01 %  | ±0.83           |

Tüm sistemi temsil eden Çizelge 4.5, fren gücü, motor devri, motor yüğü, yakıt tüketiminin kütlesi, egzoz gazı sıcaklığı, büret sistemi, dijital saat, fren termal verimliliği, fren spesifik yakıt tüketimi, fren özgül enerji tüketimi, CO, HC, NO<sub>x</sub>, Duman

parametreleri için birleşik belirsizlik oranının %3,1587 olduğunu göstermektedir. Bu yüzde, mühendislik alanlarında tipik olarak kabul edilen %5 eşiğinin altındadır ve hesaplamaların yüksek derecede hassasiyetle yapıldığını göstermektedir (Chapra ve Canale 2010).

#### **4.8 İstatiksel Analiz Metodları**

Verilerin anlaşılması ve benzer verilerle kıyaslanabilmesi için belirli kurallar çerçevesinde özetlenerek sunulması gerekmektedir. Bu amaçla çeşitli istatistiksel yöntemler geliştirilmiştir.

##### **4.8.1 MPE % (Ortalama Yüzde Hatası)**

Bu metrik, tahminlerin gözlemlerden ortalama olarak yüzde kaç sapma gösterdiğini belirtir. Negatif değerler tahminlerin gözlemlerden hafif bir şekilde düşük olduğunu, pozitif değerler ise tahminlerin hafif yüksek olduğunu gösterir.

##### **4.8.2 MAPE (Ortalama Mutlak Yüzde Hatası)**

MAPE, tahminlerin gözlemlerden ortalama olarak ne kadar sapma gösterdiğini yüzdelik olarak ifade eder. Yüksek MAPE değerleri tahminlerin gözlemlerle uyumsuz olduğunu gösterir.

##### **4.8.3 SSRE (Görelî Hataların Karesel Toplamı)**

SSRE, tahminlerin gözlemlerle uyumunu kareli hatalar toplamı şeklinde gösterir. Düşük SSRE değerleri tahminlerin daha yakın olduğunu gösterir.

##### **4.8.4 RSE (Görelî Standart Hata)**

RSE, gözlemlerle tahminler arasındaki standart hatanın görelî büyüklüğünü gösterir. Düşük RSE değerleri daha iyi tahmin doğruluğu anlamına gelir.

#### **4.8.5 MBE (Ortalama Yanlılık Hatası)**

MBE, tahminlerdeki yanlılığı gösterir. Pozitif değerler tahminlerin gözlemlerin üstünde, negatif değerler ise tahminlerin gözlemlerden düşük olduğunu ifade eder.

#### **4.8.6 RMSE (Kök Ortalama Karesel Hata)**

RMSE, tahminlerin gözlemlerden ortalama olarak ne kadar sapma gösterdiğini kare kök cinsinden verir. Daha düşük RMSE değerleri tahmin doğruluğunun yüksek olduğunu gösterir.

#### **4.8.7 t-stat (t-istatistiği)**

t-istatistiği, tahminlerin anlamlılık düzeyini değerlendirir. Yüksek t-istatistik değerleri, ilgili değişkenin tahminlerin doğruluğu üzerindeki etkisinin anlamlı olduğunu gösterir.

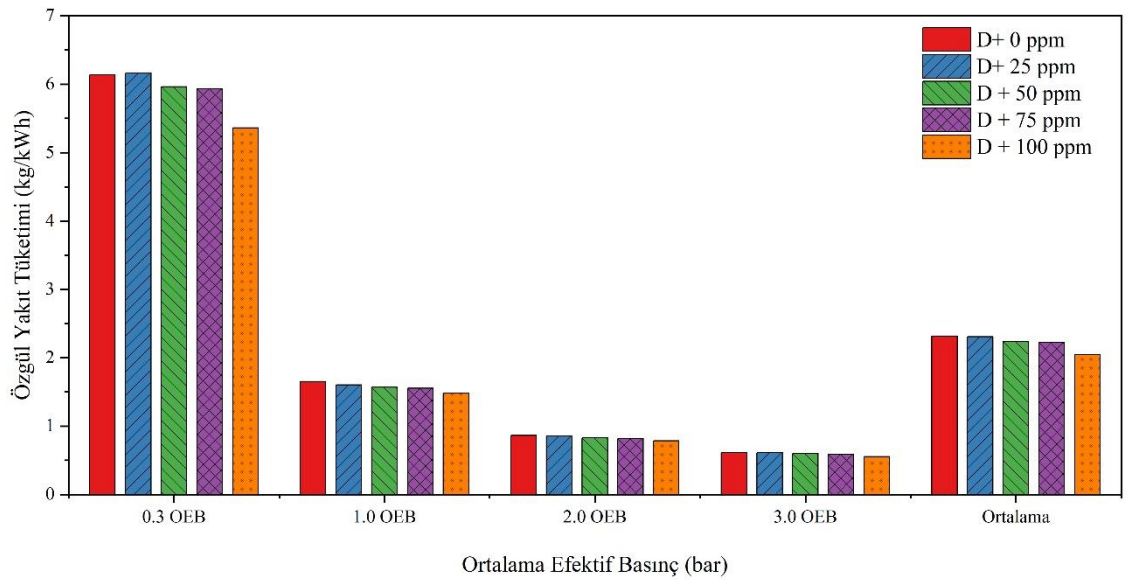


## 5. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

### 5.1. Performans Analizi

#### 5.1.1. Özgül yakıt tüketimi (ÖYT)

Kullanılan yakıtla ilgili olarak krank milinde içten yanmalı bir motor tarafından üretilen gücün etkinliği, özgül yakıt tüketimi (ÖYT) ile gösterilir. Farklı bir deyişle, 1 kWh, motor tarafından enerji alımı (iş) için kullanılan yakıt miktarı özgül yakıt tüketimi olarak tanımlanabilir. Deney yakıtlarının sabit devir (1500 d/dk) farklı motor yükleri (0.3 bar OEB, 1 bar OEB, 2 bar OEB ve 3 bar OEB) altında Şekil 5.1 ve Çizelge 5.1’ de özgül yakıt tüketimi (ÖYT) değerleri gösterilmiştir.



Şekil 5.1. Test yakıtlarının farklı OEB’ ler de özgül yakıt tüketim (kg/kWh) değerleri

0.3 OEB incelendiğinde en yüksek özgül yakıt tüketim değeri 6,2 (kg/kWh) değerine sahip yakıt DTi25 test yakıtında, en düşük özgül yakıt tüketim değeri 5,4 (kg/kWh) değerine sahip DTi100 test yakıtında görülmüştür. D, DTi50 ve DTi75 test yakıtlarındaki özgül yakıt tüketim değeri sırası ile 6,1 (kg/kWh), 6,0 (kg/kWh) ve 5,9 (kg/kWh) olarak görülmüştür.

1 OEB incelendiğinde en yüksek özgül yakıt tüketim değeri 1,7 (kg/kWh) değerine sahip yakıt D dizel test yakıtında, en düşük özgül yakıt tüketim değeri 1,5

(kg/kWh) değerine sahip DTi100 test yakıtında görülmüştür. DTi25, DTi50 ve DTi75 test yakıtlarındaki özgül yakıt tüketim değeri 1,6 (kg/kWh) olarak görülmüştür.

2 OEB incelendiğinde en yüksek özgül yakıt tüketim değeri 0,9 (kg/kWh) değerine sahip yakıt D dizel ve DTi25 test yakıtlarında, en düşük özgül yakıt tüketim değeri 0,8 (kg/kWh) değerine sahip DTi50, DTi75 ve DTi100 test yakıtlarında görülmüştür.

3 OEB incelendiğinde özgül yakıt tüketim değeri 0,6 (kg/kWh) değeri ile tüm test yakıtlarında eşit değer görülmüştür.

**Çizelge 5.1.** Test yakıtlarının farklı OEB’lerde frene özgül yakıt tüketim (kg/kWh) değerleri

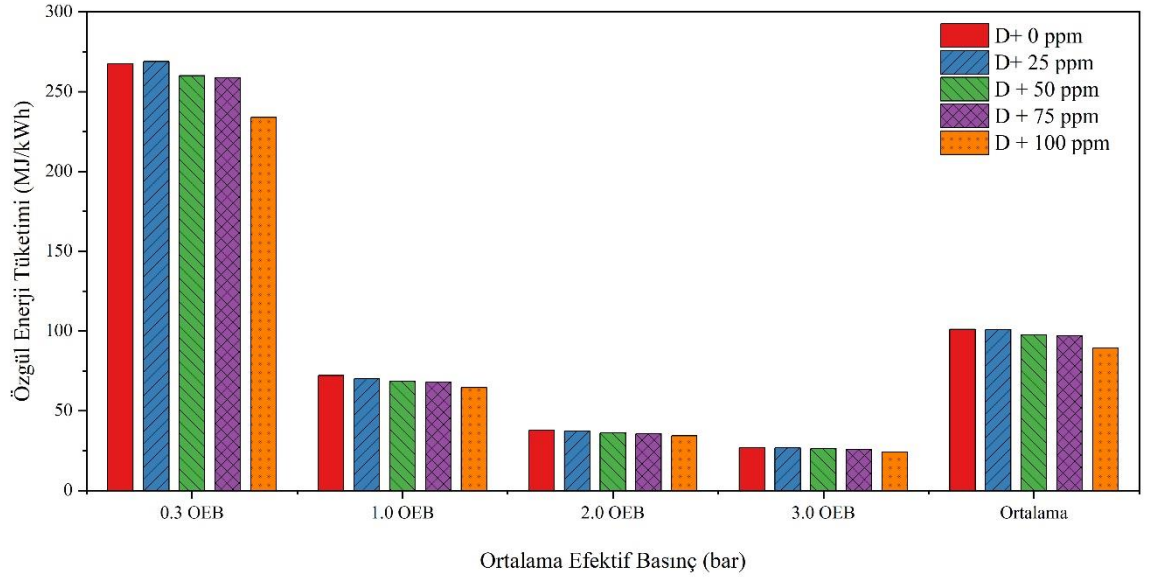
| Yakıt ismi | 0,3 bar OEB | 1 bar OEB | 2 bar OEB | 3 bar OEB | Ortalama değer |
|------------|-------------|-----------|-----------|-----------|----------------|
| D          | 6,1         | 1,7       | 0,9       | 0,6       | 2,3            |
| DTi25      | 6,2         | 1,6       | 0,9       | 0,6       | 2,3            |
| DTi50      | 6,0         | 1,6       | 0,8       | 0,6       | 2,2            |
| DTi75      | 5,9         | 1,6       | 0,8       | 0,6       | 2,2            |
| DTi100     | 5,4         | 1,5       | 0,8       | 0,6       | 2,0            |

Deney yakıtı D dizel yakıtına en yakın DTi25 test yakıtı ile arasındaki oransal fark %0,4 olarak bulunmuştur. D dizel test yakıtının DTi50, DTi75 ve DTi100 test yakıt değerleri arasındaki oransal fark sırası ile %2,2, %4,1 ve %10,1 olarak görülmüştür. Şekil 5.1 ve çizelge 5.1 incelendiğinde motor yükü arttırıldığında test yakıtlarının frene özgül yakıt tüketim (kg/kWh) değerlerinde azalma gözlenmiştir. D dizel test yakıtına göre diğer karışımli test yakıtlarının 0,3 bar düşük yükte oransal farkının yüksek olmasının nedeni katkı miktarının fazla olmasından kaynaklandığı gibi D dizel yakıtına göre karışımli yakıtların yoğunluk, vizkozite değerlerinin yüksek olması, silindir içerisinde hava/yakıt karışımlarının iyi atomizasyon gerçekleştirmediği ve silindir içerisinde sıcaklık değerlerinin düşük olması değerlendirilmektedir. Yüksek yüklerde bu farkın azalması silindir içerisinde iyi bir atomizasyon, silindir içi sıcaklığının artması ve iyi bir yanma meydana getirdiği düşünülebilir.

### 5.1.2. Özgül enerji tüketimi (ÖET)

Fren özgül enerji tüketimi, test için hazırlanan yakıtların farklı ısı değer ve farklı yoğunluklarda karşılaştırmasına olanak veren bir parametre olarak kabul edilir. Yakıta ait

ısıl değer ile Fren özgül enerji tüketimi (ÖET) hesaplaması yapılır ve belirli bir çıkış gücünü elde etmek için ihtiyaç duyulan enerji olarak tanımlanabilir. Deney yakıtlarının sabit devir (1500 d/dk) farklı motor yükleri (0.3 bar OEB, 1 bar OEB, 2 bar OEB ve 3 bar OEB) altında Şekil 5.2 ve Çizelge 5.2’ de fren özgül enerji tüketimi (FÖET) değerleri gösterilmiştir.



**Şekil 5.2.** Test yakıtlarının farklı OEB’ ler de özgül enerji tüketim (MJ/kWh) değerleri

0.3 OEB incelendiğinde en yüksek özgül enerji tüketim 268,8 (MJ/kWh) değerine sahip yakıt DTi25 test yakıtında, en düşük özgül enerji tüketim 233,8 (MJ/kWh) değerine sahip DTi100 test yakıtında görülmüştür. D, DTi50 ve DTi75 test yakıtlarının özgül enerji tüketim değerleri sırası ile 267,5 (MJ/kWh), 260,0 (MJ/kWh) ve 258,8 (MJ/kWh) olarak görülmüştür.

1 OEB incelendiğinde en yüksek özgül enerji tüketim 72,0 (MJ/kWh) değerine sahip yakıt D dizel test yakıtında, en düşük özgül enerji tüketim 64,5 (MJ/kWh) değerine sahip DTi100 test yakıtında görülmüştür. DTi25, DTi50 ve DTi75 test yakıtlarının özgül enerji tüketim değerleri sırası ile 69,9 (MJ/kWh), 68,4 (MJ/kWh) ve 67,8 (MJ/kWh) olarak görülmüştür.

2 OEB incelendiğinde en yüksek özgül enerji tüketim 37,7 (MJ/kWh) değerine sahip yakıt D dizel test yakıtında, en düşük özgül enerji tüketim 34,2 (MJ/kWh) değerine sahip DTi100 test yakıtında görülmüştür. DTi25, DTi50 ve DTi75 test yakıtlarının özgül

enerji tüketim değerleri sırası ile 37,2 (MJ/kWh), 36,2 (MJ/kWh) ve 35,6 (MJ/kWh) olarak görülmüştür.

3 OEB incelendiğinde en yüksek özgül enerji tüketim 26,8 (MJ/kWh) değerine sahip yakıt D dizel test yakıtında, en düşük özgül enerji tüketim 24,1 (MJ/kWh) değerine sahip DTi100 test yakıtında görülmüştür. DTi25, DTi50 ve DTi75 test yakıtlarının özgül enerji tüketim değerleri sırası ile 26,7 (MJ/kWh), 26,2 (MJ/kWh) ve 25,7 (MJ/kWh) olarak görülmüştür.

**Çizelge 5.2.** Test yakıtlarının farklı OEB’lerde özgül enerji tüketim (MJ/kWh) değerleri

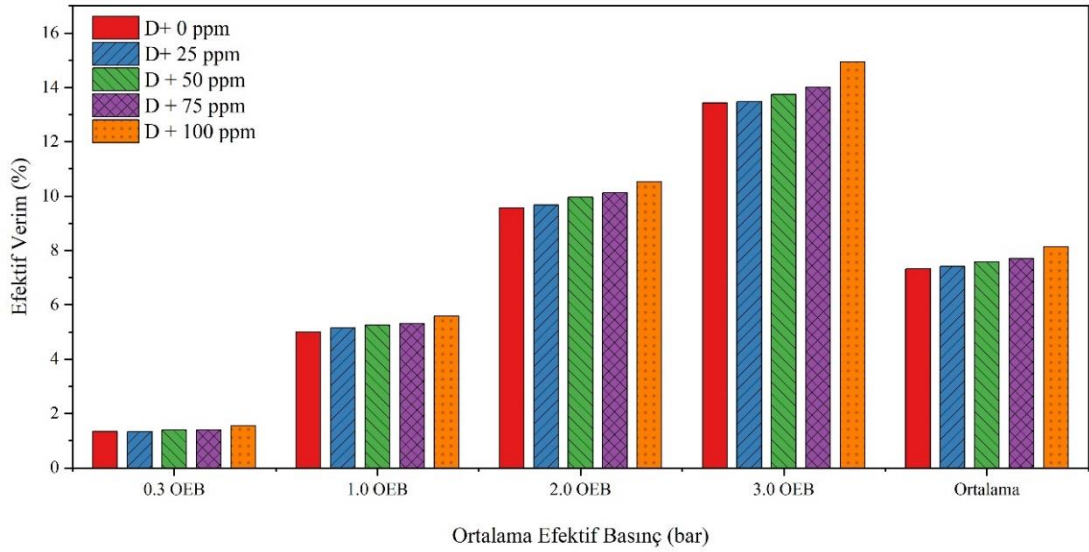
| Yakıt ismi | 0,3 bar OEB | 1 bar OEB | 2 bar OEB | 3 bar OEB | Ortalama değer |
|------------|-------------|-----------|-----------|-----------|----------------|
| D          | 267,5       | 72,0      | 37,7      | 26,8      | 101,0          |
| DTi25      | 268,8       | 69,9      | 37,2      | 26,7      | 100,7          |
| DTi50      | 260,0       | 68,4      | 36,2      | 26,2      | 97,7           |
| DTi75      | 258,8       | 67,8      | 35,6      | 25,7      | 97,0           |
| DTi100     | 233,8       | 64,5      | 34,2      | 24,1      | 89,2           |

Deney yakıtı D dizel test yakıtına en yakın DTi25 test yakıtı ile arasındaki oransal fark %0,4 olarak bulunmuştur. D dizel test yakıtının DTi50, DTi75 ve DTi100 test yakıt değerleri arasındaki oransal fark sırası ile %2,2, %4,1 ve %10,1 olarak görülmüştür. Şekil 5.2 ve çizelge 5.2 incelendiğinde motor yükü arttırıldığında test yakıtlarının özgül enerji tüketim (MJ/kWh) değerlerinde azalma gözlenmiştir. Özgül enerji tüketim değerinin motor yükünde artışla azaldığı tam tük altında en düşük değerlere ulaştığı belirlenmiştir. Aynı motor performans değerlerini elde etmek için karışımli test yakıtlarının dizel test yakıtına göre daha az yakıt harcadığı gözlenmiştir. D dizel test yakıtının TiO<sub>2</sub> karışımli test yakıtlarına kıyasla daha az enerji içeriğine sahip olduğundan dolayı karışımli test yakıtlarının içerisinde TiO<sub>2</sub> miktarının artması daha az özgül yakıt tüketimine neden olacaktır.

### 5.1.3. Efektif verim

İçten yanmalı motorlarda yanmanın gerçekleşmesinden sonra ısı enerjisi ortaya çıkar ve bu enerjinin mekanik enerjiye dönmesi faydalı iş olarak tanımlanır. Isı enerjisini faydalı işe dönüştürme gücüne efektif verim ya da fren termal verimi (BTE) adı verilir. Deney yakıtlarının sabit devir (1500 d/dk) farklı motor yükleri (0.3 bar OEB, 1 bar OEB,

2 bar OEB ve 3 bar OEB) altında Şekil 5.3 ve çizelge 5.3' de efektif verim değerleri gösterilmiştir.



**Şekil 5.3.** Test yakıtlarının farklı OEB' ler de efektif verim (%) değerleri

0.3 OEB incelendiğinde en yüksek efektif verim değeri 1,5 (%) değerine sahip yakıt DTi100 test yakıtında, en düşük efektif verim değeri 1,3 (%) değerine sahip D ve DTi25 test yakıtlarında görülmüştür. DTi50 ve DTi75 test yakıtlarındaki efektif verim değeri 1,4 (%) olarak görülmüştür.

1 OEB incelendiğinde en yüksek efektif verim değeri 5,6 (%) değerine sahip yakıt DTi100 test yakıtında, en düşük efektif verim değeri 5,0 (%) değerine sahip D dizel test yakıtında görülmüştür. DTi25, DTi50 ve DTi75 test yakıtlarındaki efektif verim değeri sırası ile 5,1 (%), 5,3 (%), 5,3 (%) olarak görülmüştür.

2 OEB incelendiğinde en yüksek efektif verim değeri 10,5 (%) değerine sahip yakıt DTi100 test yakıtında, en düşük efektif verim değeri 9,6 (%) değerine sahip D dizel test yakıtında görülmüştür. DTi25, DTi50 ve DTi75 test yakıtlarındaki efektif verim değeri sırası ile 9,7 (%), 10,0 (%), 10,1 (%) olarak görülmüştür.

3 OEB incelendiğinde en yüksek efektif verim değeri 14,9 (%) değerine sahip yakıt DTi100 test yakıtında, en düşük efektif verim değeri 13,4 (%) değerine sahip D dizel test yakıtında görülmüştür. DTi25, DTi50 ve DTi75 test yakıtlarındaki efektif verim değeri sırası ile 13,5 (%), 13,7 (%), 14,0 (%) olarak görülmüştür.

**Çizelge 5.3.** Test yakıtlarının farklı OEB'lerde efektif verim (%) değerleri

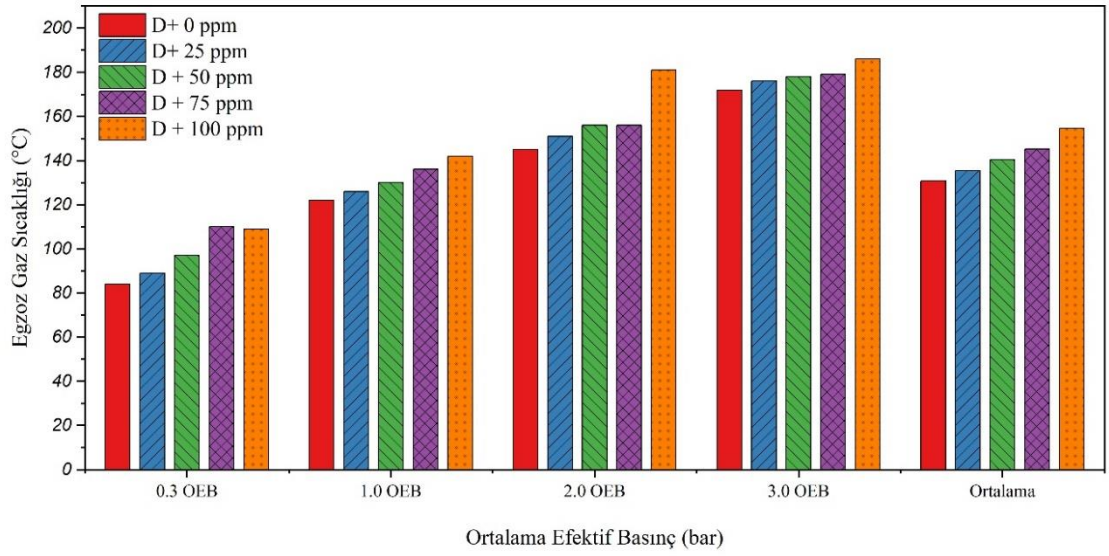
| Yakıt ismi | 0,3 bar OEB | 1 bar OEB | 2 bar OEB | 3 bar OEB | Ortalama değer |
|------------|-------------|-----------|-----------|-----------|----------------|
| D          | 1,3         | 5,0       | 9,6       | 13,4      | 7,3            |
| DTi25      | 1,3         | 5,1       | 9,7       | 13,5      | 7,4            |
| DTi50      | 1,4         | 5,3       | 10,0      | 13,7      | 7,6            |
| DTi75      | 1,4         | 5,3       | 10,1      | 14,0      | 7,7            |
| DTi100     | 1,5         | 5,6       | 10,5      | 14,9      | 8,1            |

Deney yakıtı D dizel yakıtına en yakın DTi25 test yakıtı ile arasındaki oransal fark %-0,4 olarak bulunmuştur. D dizel test yakıtının DTi50, DTi75 ve DTi100 test yakıt değerleri arasındaki oransal fark sırası ile %-2,3, %-4,3 ve %-11,2 olarak görülmüştür. Şekil 5.3 ve çizelge 5.3 incelendiğinde motor yükü arttırıldığında test yakıtlarının efektif verim (%) değerlerinde artma gözlenmiştir. Efektif verim değerinin motor yükünde artışla arttığını ve tam tük altında en yüksek değerlere ulaştığı belirlenmiştir. Test yakıtlarında TiO<sub>2</sub> katkı miktarının artması efektif verimi arttırmıştır. Karışımli test yakıtlarının uygun şekilde yakılması, daha iyi bozunma ve nano parçacığın yüksek yüzey alanı/hacim oranı ile yakıtın hızlı dağılımı olduğu düşünülebilir.

#### 5.1.4. Egzoz gaz sıcaklığı

Hava/yakıt karışımının içten yanmalı motorlarda yanması sonucu yanma odasından atmosfere egzoz gazı atılır. Yanma odasında gazlar birbirleriyle reaksiyona girerek yeni olumlar oluştururlar. Bu nedenle egzoz gazı sıcaklığının incelenmesi önemli bir parametredir. Deney yakıtlarının sabit devir (1500 d/dk) farklı motor yükleri (0.3 bar OEB, 1 bar OEB, 2 bar OEB ve 3 bar OEB) altında Şekil 5.4 ve Çizelge 5.4' de egzoz gazı sıcaklık (°C) değerleri gösterilmiştir.





**Şekil 5.4.** Test yakıtlarının farklı OEB' ler de egzoz gaz sıcaklığı (°C) değerleri

0.3 OEB incelendiğinde en yüksek egzoz gaz sıcaklık değeri 110 (°C) ile DTi75 test yakıtında, en düşük egzoz gaz sıcaklık değeri 84 (°C) ile D dizel test yakıtında görülmüştür. DTi25, DTi50 ve DTi100 test yakıtlarındaki egzoz gaz sıcaklık değerleri sırası ile 89 (°C), 97 (°C), 109 (°C) olarak görülmüştür.

1 OEB incelendiğinde en yüksek egzoz gaz sıcaklık değeri 142 (°C) ile DTi100 test yakıtında, en düşük egzoz gaz sıcaklık değeri 122 (°C) ile D dizel test yakıtında görülmüştür. DTi25, DTi50 ve DTi75 test yakıtlarındaki egzoz gaz sıcaklık değerleri sırası ile 126 (°C), 130 (°C), 136 (°C) olarak görülmüştür.

2 OEB incelendiğinde en yüksek egzoz gaz sıcaklık değeri 181 (°C) ile DTi100 test yakıtında, en düşük egzoz gaz sıcaklık değeri 145 (°C) ile D dizel test yakıtında görülmüştür. DTi25, DTi50 ve DTi75 test yakıtlarındaki egzoz gaz sıcaklık değerleri sırası ile 151 (°C), 156 (°C), 156 (°C) olarak görülmüştür.

3 OEB incelendiğinde en yüksek egzoz gaz sıcaklık değeri 186 (°C) ile DTi100 test yakıtında, en düşük egzoz gaz sıcaklık değeri 172 (°C) ile D dizel test yakıtında görülmüştür. DTi25, DTi50 ve DTi75 test yakıtlarındaki egzoz gaz sıcaklık değerleri sırası ile 176 (°C), 178 (°C), 179 (°C) olarak görülmüştür.

**Çizelge 5.4.** Test yakıtlarının farklı OEB’lerde egzoz gazı sıcaklık (°C) değerleri

| Yakıt ismi | 0,3 bar OEB | 1 bar OEB | 2 bar OEB | 3 bar OEB | Ortalama değer |
|------------|-------------|-----------|-----------|-----------|----------------|
| D          | 84          | 122       | 145       | 172       | 130,75         |
| DTi25      | 89          | 126       | 151       | 176       | 135,5          |
| DTi50      | 97          | 130       | 156       | 178       | 140,25         |
| DTi75      | 110         | 136       | 156       | 179       | 145,25         |
| DTi100     | 109         | 142       | 181       | 186       | 154,5          |

Deney yakıtı D dizel yakıtına en yakın DTi25 test yakıtı ile arasındaki oransal fark %-3,63 olarak bulunmuştur. D dizel test yakıtının DTi50, DTi75 ve DTi100 test yakıt değerleri arasındaki oransal fark sırası ile %-7,27, %-11,09 ve %-18,16 olarak görülmüştür. Şekil 5.4 ve çizelge 5.4 incelendiğinde motor yükü ve karışımli yakıtların nano-madde miktarı arttırıldığında test yakıtlarının egzoz gaz sıcaklık (°C) değerinde de artma gözlenmiştir. D dizel test yakıtına göre egzoz gaz sıcaklık değerinin yüksek çıkmasının nedeni silindir içerisindeki sıcaklık değerinin yüksek seviyede olması düşünülebilir. D dizel test yakıtının egzoz gaz sıcaklık değeri, katkılı TiO<sub>2</sub> test yakıtlarından daha az oksijen içerdiğinden yanma sonu sıcaklıkları daha düşük kalmaktadır. Katkı miktarının arttırılmasıyla, en yüksek oksijen içeriğine sahip DTi100 karışımli test yakıtı, silindir içi sıcaklığı en yüksek yakıt olduğundan en yüksek egzoz gaz sıcaklık değeri bu test yakıtında görülmüştür.

## 5.2. Emisyon Analizi

Çevre bilinci son yıllarda artan önem taşıyan bir alan olmuştur. Hava kirliliğinin önemli bir sorun olduğu yaygın olarak kabul edilmektedir. Hava kirliliğinin birincil kaynakları arasında endüstriyel emisyonlar, ısıtmadan kaynaklanan ev emisyonları, termik santraller ve araçlar bulunur. Egzoz emisyonları da dahil olmak üzere motorlu taşıtlardan kaynaklanan emisyonlar, havada bulunan kirleticilere önemli bir katkıda bulunur. Motorlu taşıtlarda fosil yakıtların yanması, diğer kirleticiler arasında karbondioksit, su buharı ve azot oksit bileşiklerinin oluşumuna yol açar. Bununla birlikte, gerçekte ideal yanma koşullarına ulaşmak zordur ve bu da çeşitli diğer zararlı elementlerin oluşumuyla sonuçlanır. Motorlu taşıtlardan gelen egzozlar, parafinler, olefinler, aromatikler, aldehitler, ketonlar, karboksilik asitler, karbon monoksit, nitrojen oksitler, kurşun bileşikleri ve partikül madde gibi çeşitli maddelerden oluşan hava



kirleticilerinin %75'inden sorumludur (KELEN 2014). İnsan sağlığı ve evre kalitesi düşünldğnde olumsuz etki olarak emisyonlar altı grupta incelenir. Bunlar aşağda gösterilmiştir;

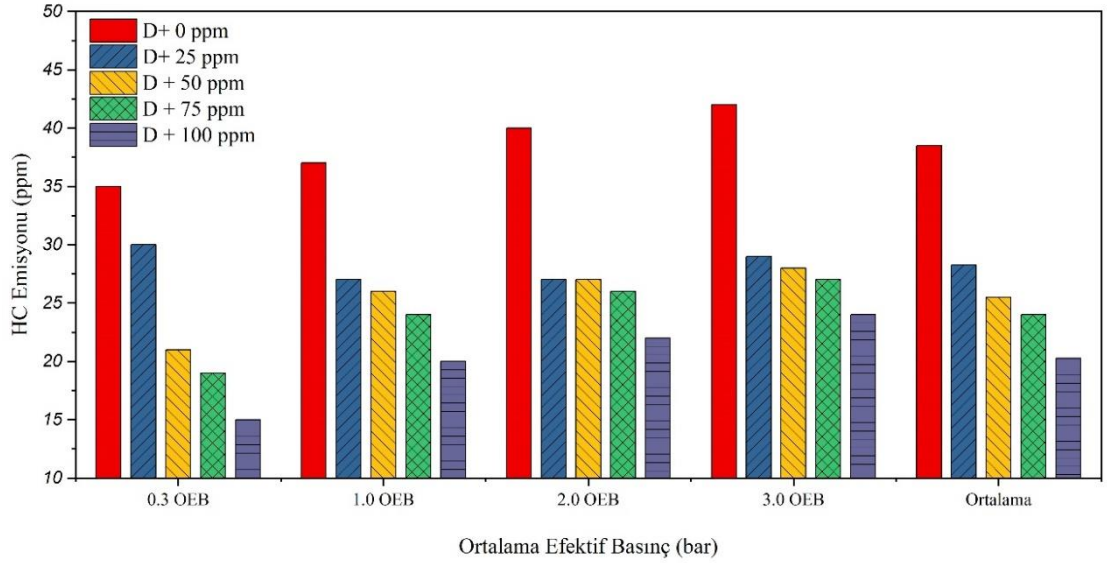
- Azot oksitler,
- Karbon oksitler,
- Hidrokarbonlar,
- Kükürtlü bileşenler,
- Partikllerdir,
- Aldehitler (Borat vd. 1992).

Yakıt ve hava içten yanmalı motorların yanma odasında birleştirildiğinde kimyasal bir reaksiyon gerçekleşir. Kimyasal reaksiyon, hem yanmamaya hem de yanmaz kirleticilerin havaya salınmasına neden olan yakıt-hava karışımını içerir, hava kirliliğine katkıda bulunur ve insan sağlığını olumsuz etkiler. Bu süreç sağlığın bozulmasına yol açar. Motor alışması bağlamında, hava miktarı yakıt miktarını aştığında ( $HFK > 1$ ) bir yakıt-hava karışımı zayıf kabul edilir, bu da tam yanma sonunda  $CO_2$ ,  $H_2O$ ,  $SO_2$ ,  $N_2$  ve  $O_2$  gibi gazların emisyonuna neden olur. İdeal tam yanma koşullarında, yanma işleminde yer alan havanın hacmi teorik hava miktarına eşittir ( $HFK = 1$ ), bu da egzoz gazında  $CO_2$ ,  $HO_2$ ,  $SO_2$  ve  $N_2$  gibi emisyon gazlarının varlığına yol açar. Teorik tam yanma ile gerçek tam yanma arasındaki ayırım, ikincisinde egzoz emisyonunda  $O_2$  bulunmamasında yatmaktadır. Tersine, karışımdaki yakıt oranı zengin bir karışım olarak adlandırılan hava oranını ( $HFK < 1$ ) aştığında eksik yanma meydana gelir. Hava miktarının uygun yanma için yetersiz olduğu durumlarda, eksik yanma  $CO_2$ ,  $H_2O$ ,  $SO_2$  ve  $CO$  emisyonuna neden olurD, DTi25, DTi50, DTi75 ve DTi100 yakıt karışımlarına ait  $CO$ ,  $HC$ ,  $NO_x$  ve duman koyuluğunun emisyon lçm yapılarak bulunan değerler grafiklerle gösterilmiştir.

### 5.2.1. HC emisyonları

Hidrokarbon (HC) emisyonlarının oluşumu, silindir içindeki yakıtın eksik yanmasından kaynaklanır ve yanmamış yakıtla sonuçlanır (Aydın, Afşar, ve elik 2017b). Silindir içindeki Hava-Yakıt Karışımlarının bir kombinasyonu, aşırı zengin veya yağsız oranlardan dolayı yanma reaksiyonlarının meydana gelmesine neden olarak, süreçte yavaşlamaya neden olur ve böylece tamamlanmasını engeller. Bu senaryo, alevin pistonun st yüzeyine doğru ilerlememesinin ve ısı retmemesinin bir sonucu olarak

istenen sıcaklığa ulaşılmadığında ortaya çıkar. Sonuç olarak, yanmamış HC gazları alevin sona ermesi nedeniyle üretilir ve enerji kayıplarına yol açar (Tan 2022). Deney yakıtlarının sabit devir (1500 d/dk) farklı motor yükleri (0.3 bar OEB, 1 bar OEB, 2 bar OEB ve 3 bar OEB) altında Çizelge 5.5 ve Şekil 5.5’ de HC emisyon (ppm) değerleri gösterilmiştir.



Şekil 5.5. Test yakıtlarının farklı OEB’ ler de HC emisyon (ppm) değerleri

0.3 OEB incelendiğinde en yüksek HC emisyonu 35 ppm değerine sahip yakıt D dizel yakıtı, en düşük HC emisyonu 15 ppm ile DTi100 test yakıtında görülmüştür. DTi25, DTi50 ve DTi75 test yakıtlarındaki HC emisyon değerleri sırası ile 30 ppm, 21 ppm ve 19 ppm olarak görülmüştür.

1 OEB incelendiğinde en yüksek HC emisyonu 37 ppm değerine sahip yakıt D dizel yakıtı, en düşük HC emisyonu 20 ppm ile DTi100 test yakıtında görülmüştür. DTi25, DTi50 ve DTi75 test yakıtlarındaki HC emisyon değerleri sırası ile 27 ppm, 26 ppm ve 24 ppm olarak görülmüştür.

2 OEB incelendiğinde en yüksek HC emisyonu 40 ppm değerine sahip yakıt D dizel yakıtı, en düşük HC emisyonu 22 ppm ile DTi100 test yakıtında görülmüştür. DTi25, DTi50 ve DTi75 test yakıtlarındaki HC emisyon değerleri sırası ile 27 ppm, 27 ppm ve 26 ppm olarak görülmüştür.

3 OEB incelendiğinde en yüksek HC emisyonu 42 ppm değerine sahip yakıt D dizel yakıtı, en düşük HC emisyonu 24 ppm ile DTi100 test yakıtında görülmüştür.

DTi25, DTi50 ve DTi75 test yakıtlarındaki HC emisyon değerleri sırası ile 29 ppm, 28 ppm ve 27 ppm olarak görülmüştür.

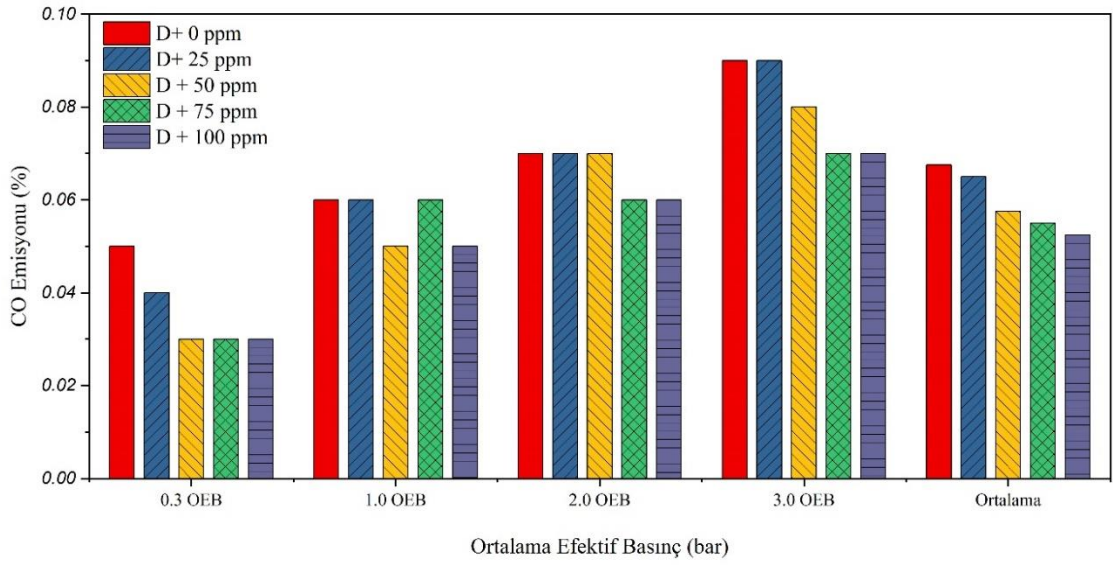
**Çizelge 5.5.** Test yakıtlarının farklı OEB’lerde HC emisyon (ppm) değerleri

| Yakıt ismi | 0,3 bar OEB | 1 bar OEB | 2 bar OEB | 3 bar OEB | Ortalama değer |
|------------|-------------|-----------|-----------|-----------|----------------|
| D          | 35          | 37        | 40        | 42        | 38,5           |
| DTi25      | 30          | 27        | 27        | 29        | 28,25          |
| DTi50      | 21          | 26        | 27        | 28        | 25,5           |
| DTi75      | 19          | 24        | 26        | 27        | 24             |
| DTi100     | 15          | 20        | 22        | 24        | 20,25          |

Deney yakıtı D dizel yakıtına en yakın DTi25 test yakıtı ile arasındaki oransal fark %26,6 olarak bulunmuştur. D dizel test yakıtının DTi50, DTi75 ve DTi100 test yakıt değerleri arasındaki oransal fark sırası ile %33,8, %37,7 ve %47,4 olarak görülmüştür. Şekil 5.5 ve çizelge 5.5 incelendiğinde motor yükü arttırıldığında DTi25 yakıtı hariç diğer test yakıtlarının HC emisyon değerlerinde artış gözlenmiştir. Hidrokarbon (HC) emisyonlarındaki artışa katkıda bulunan başlıca faktörler, silindir içindeki düşük sıcaklık nedeniyle yerel yanmaya erişilemeyen bölgelerde sönmüleme olgusu, motor için gerekli enerjiyi üretmek için yakıt açısından zengin bir karışımın kullanılması ve diğer ilgili parametreleri içerir. TiO<sub>2</sub> katkılı yakıt karışımlarının HC emisyonları D dizel test yakıtına göre düşük çıkması silindir içerisindeki yanmanın daha verimli olacağı değerlendirilmektedir.

### 5.2.2. CO emisyonları

Hava yakıt oranı CO üretimi üzerinde kayda değer bir etki yaratırken, CO<sub>2</sub> seviyesi de bununla birlikte değişir. Dizel motorlar, CO emisyonuna neden olan eksik bir yakıt karışımı ile çalışmaları nedeniyle standartların altında kabul edilir. Yanma odasındaki oksijenin bu yetersizliği, CO emisyonunda bir artışa yol açar. Hava yakıt oranının yetersiz olduğu durumlarda, yanma için gereken oksijen yetersiz olduğu için CO emisyonu kalmaya devam eder. Tersine, yüksek bir hava yakıt oranıyla, yakıt yeterli miktarda oksijen içerir ve bu da karbonun CO<sub>2</sub> 'e dönüşmesine yol açar (Sütcü 2021). Deney yakıtlarının sabit devir (1500 d/dk) farklı motor yükleri (0.3 bar OEB, 1 bar OEB, 2 bar OEB ve 3 bar OEB) altında Şekil 5.6’ de CO emisyon değerleri (%) gösterilmiştir.



**Şekil 5.6.** Test yakıtlarının farklı OEB'lerde CO emisyon (%) değerleri

0.3 OEB incelendiğinde en yüksek CO emisyonu %0,05 oranına sahip yakıt D dizel yakıtı, en düşük CO emisyonu %0,03 oranına sahip DTi50, DTi75 ve DTi100 test yakıtlarında görülmüştür. DTi25 test yakıtının CO emisyonu %0,04 oranında görülmüştür.

1 OEB incelendiğinde en yüksek CO emisyonu %0,06 oranına sahip D, DTi25 ve DTi75 test yakıtlarında, en düşük CO emisyonu %0,05 oranına sahip DTi50 ve DTi100 test yakıtlarında görülmüştür.

2 OEB incelendiğinde en yüksek CO emisyonu %0,07 oranına sahip D, DTi25 ve DTi50 test yakıtlarında, en düşük CO emisyonu %0,06 oranına sahip DTi75 ve DTi100 test yakıtlarında görülmüştür.

3 OEB incelendiğinde en yüksek CO emisyonu %0,09 oranına sahip D ve DTi25 test yakıtlarında, en düşük CO emisyonu %0,07 oranına sahip DTi75 ve DTi100 test yakıtlarında görülmüştür. DTi50 test yakıtının CO emisyonu %0,08 oranında görülmüştür.

**Çizelge 5.6.** Test yakıtlarının farklı OEB' ler de CO emisyon (%) değerleri

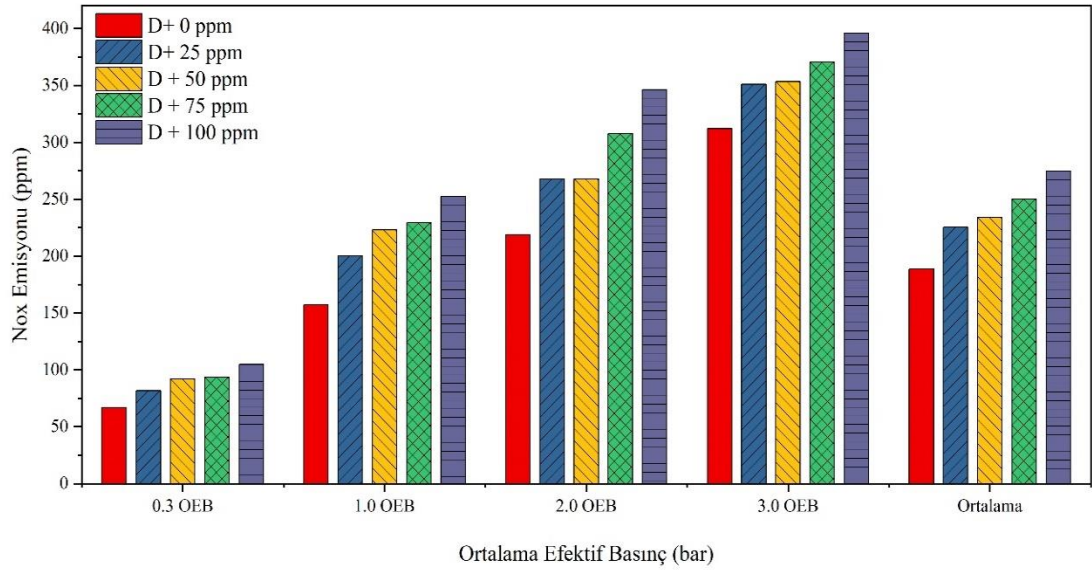
| Yakıt ismi | 0,3 bar OEB | 1 bar OEB | 2 bar OEB | 3 bar OEB | Ortalama değer |
|------------|-------------|-----------|-----------|-----------|----------------|
|------------|-------------|-----------|-----------|-----------|----------------|

|        |      |      |      |      |        |
|--------|------|------|------|------|--------|
| D      | 0,05 | 0,06 | 0,07 | 0,09 | 0,0675 |
| DTi25  | 0,04 | 0,06 | 0,07 | 0,09 | 0,065  |
| DTi50  | 0,03 | 0,05 | 0,07 | 0,08 | 0,0575 |
| DTi75  | 0,03 | 0,06 | 0,06 | 0,07 | 0,055  |
| DTi100 | 0,03 | 0,05 | 0,06 | 0,07 | 0,0525 |

Deney yakıtı D dizel yakıtına en yakın DTi25 test yakıtı ile arasındaki oransal fark %3,7 olarak bulunmuştur. D dizel test yakıtının DTi50, DTi75 ve DTi100 test yakıt değerleri arasındaki oransal fark sırası ile %14,81, %18,52 ve %22,22 olarak görülmüştür. Şekil 5.6 ve çizelge 5.6 incelendiğinde motor yükü arttırıldığında test yakıtlarının CO emisyon değerlerinde artışın gözlemlendiği, 0,3 OEB’ de D dizel test yakıtının aynı yükteki diğer test yakıtlarına göre daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. CO oluşmasının nedeni yeterli miktarda oksijen olmaması durumunda yanmanın eksik olacağı ve buna bağlı olarak motor yükünün artmasıyla hava/yakıt oranının da azalma ve CO miktarında artışa neden olmaktadır. TiO<sub>2</sub> katkılı yakıt karışımlarında bulunan oksijenin miktarı D dizel test yakıtına oranla daha fazla olduğu için CO emisyonu bu sebeple daha düşük olduğu tespit edilmiştir.

### 5.2.3. No<sub>x</sub> emisyonları

Yanma odasında elde edilen maksimum sıcaklık ve hava/yakıt oranı gibi faktörler, yanma sırasında NO<sub>x</sub> emisyonlarının konsantrasyonu üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Bu nedenle, NO<sub>x</sub> gazlarını azaltmak için en etkili yaklaşım, yanma odası içindeki sıcaklığın 1800°C'nin altında kontrol edilmesini veya yüksek sıcaklıklara maruz kalma süresini mümkün olan en büyük ölçüde en aza indirmeyi içerir. Hava fazlalığı katsayısı, nitrojen oksit oluşumunu etkileyen bir başka önemli faktördür. Spesifik olarak, HFK= 1.1 olduğunda, azot ve oksijenin varlığı en yüksek nitrojen oksit oluşumuna yol açar. Silindir içindeki sıcaklık ile gaz etkileşimi bu süreçte önemli bir rol oynar. Bu katsayı arttıkça, NO<sub>x</sub> emisyonu miktarındaki bir azalma ile önemli ölçüde azalacaktır (Eliçin 2011). Deney yakıtlarının sabit devir (1500 d/dk) farklı motor yükleri (0.3 bar OEB, 1 bar OEB, 2 bar OEB ve 3 bar OEB) altında Şekil 5.7’ de NO<sub>x</sub> emisyon değerleri (%) gösterilmiştir.



**Şekil 5.7.** Test yakıtlarının farklı OEB’lerde NO<sub>x</sub> emisyon (ppm) değerleri

0.3 OEB incelendiğinde en yüksek NO<sub>x</sub> emisyonu 104,63 ppm ile DTi100 test yakıtında, en düşük NO<sub>x</sub> emisyonu 67 ppm değerine sahip yakıt D dizel yakıtında görülmüştür. DTi25, DTi50 ve DTi75 test yakıtlarındaki NO<sub>x</sub> emisyon değerleri sırası ile 81,68 ppm, 92,23 ppm ve 93,61 ppm olarak görülmüştür.

1 OEB incelendiğinde en yüksek NO<sub>x</sub> emisyonu 252,64 ppm ile DTi100 test yakıtında, en düşük NO<sub>x</sub> emisyonu 157 ppm değerine sahip yakıt D dizel yakıtında görülmüştür. DTi25, DTi50 ve DTi75 test yakıtlarındaki NO<sub>x</sub> emisyon değerleri sırası ile 200,31 ppm, 222,86 ppm ve 229,18 ppm olarak görülmüştür.

2 OEB incelendiğinde en yüksek NO<sub>x</sub> emisyonu 346,22 ppm ile DTi100 test yakıtında, en düşük NO<sub>x</sub> emisyonu 219 ppm değerine sahip yakıt D dizel yakıtında görülmüştür. DTi25, DTi50 ve DTi75 test yakıtlarındaki NO<sub>x</sub> emisyon değerleri sırası ile 268,01 ppm, 268,01 ppm ve 307,64 ppm olarak görülmüştür.

3 OEB incelendiğinde en yüksek NO<sub>x</sub> emisyonu 395,73 ppm ile DTi100 test yakıtında, en düşük NO<sub>x</sub> emisyonu 312 ppm değerine sahip yakıt D dizel yakıtında görülmüştür. DTi25, DTi50 ve DTi75 test yakıtlarındaki NO<sub>x</sub> emisyon değerleri sırası ile 351 ppm, 353,29 ppm ve 370,5 ppm olarak görülmüştür.

**Çizelge 5.7.** Test yakıtlarının farklı OEB' ler de NO<sub>x</sub> emisyon (ppm) değerleri

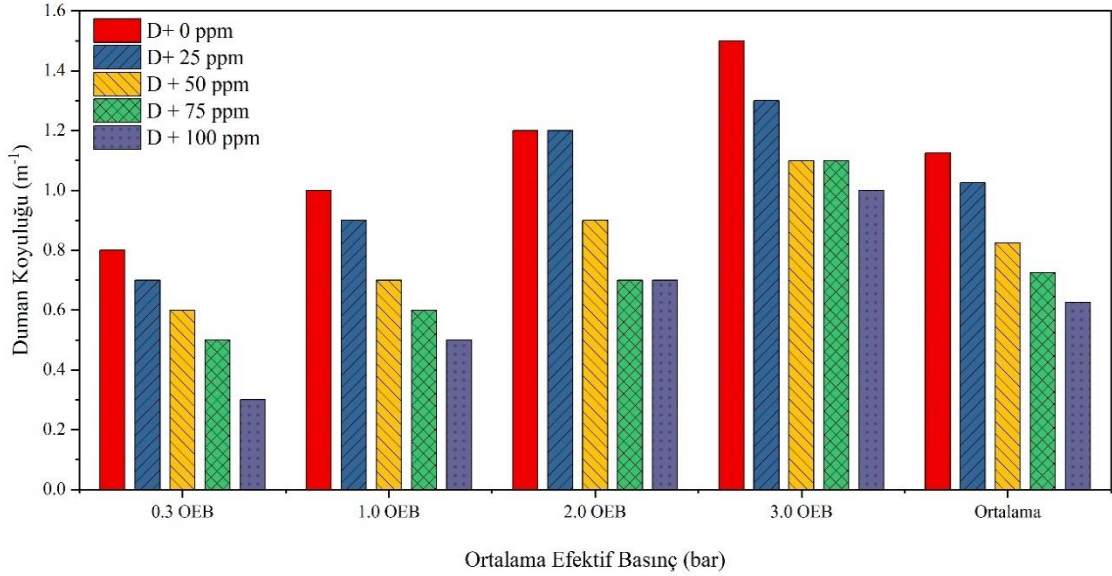
| Yakıt ismi | 0,3 bar OEB | 1 bar OEB | 2 bar OEB | 3 bar OEB | Ortalama değer |
|------------|-------------|-----------|-----------|-----------|----------------|
| D          | 67          | 157       | 219       | 312       | 188,75         |
| DTi25      | 81,68       | 200,31    | 268,01    | 351       | 225,25         |
| DTi50      | 92,23       | 222,86    | 268,01    | 353,29    | 234,10         |
| DTi75      | 93,61       | 229,18    | 307,64    | 370,5     | 250,36         |
| DTi100     | 104,63      | 252,64    | 346,22    | 395,73    | 274,80         |

Deney yakıtı D dizel yakıtına en yakın DTi25 test yakıtı ile arasındaki oransal fark %-19,3 olarak bulunmuştur. D dizel test yakıtının DTi50, DTi75 ve DTi100 test yakıt değerleri arasındaki oransal fark sırası ile %-24,0, %-32,6 ve %-45,6 olarak görülmüştür. Şekil 5.7 ve çizelge 5.7 incelendiğinde motor yükü artırıldığında test yakıtlarının NO<sub>x</sub> emisyon değerlerinde artışı gözlenmiştir. NO<sub>x</sub> emisyonu yüksek sıcaklıklarda azotun oksijen ile reaksiyonu sonucu oluşur. (Aydın, Afşar, ve Çelik 2017a) TiO<sub>2</sub> katkılı yakıt karışımlarının D dizel test yakıtına göre emisyon değerlerinin yüksek çıkmasının nedeni silindir içerisindeki sıcaklık değerinin yüksek seviyede olması düşünülebilir. D dizel test yakıtının NO<sub>x</sub> değerleri katkılı TiO<sub>2</sub> test yakıtlarından daha az oksijen içerdiğinden yanma sonu sıcaklıkları daha düşük kalmaktadır. Katkı miktarının artırılmasıyla DTi100 karışımı test yakıtında en yüksek oksijen içeriğinden dolayı silindir içi sıcaklığı en yüksek olacaktır bu durum en yüksek NO<sub>x</sub> emisyon oluşumuna neden olacaktır. Elde edilen deneysel verilerin NO<sub>x</sub> emisyonu bakımından literatürde benzer çalışmalar ile uyumlu olduğu görülmüştür.

#### 5.2.4. Duman koyuluğu (İS)

Dizel motorlarının gücünün artırılması, silindire enjekte edilen yakıt miktarına bağlıdır. Deneysel analiz yoluyla, motorun konfigürasyonunun Dizel yakıtı barındıracak şekilde uyarlandığı ve böylece Dizel yakıtla kıyasla karışımlarda bulunan duman seviyesinde potansiyel bir artışa yol açabilecek bir yanma yan ürünü ürettiği ortaya çıkmaktadır. Bu ürün, giriş işlemi sırasında elde edilen nihai sıcaklıktan etkilenen bir faktör olan silindir içindeki havanın varlığı ile ilişkilidir. Sıcaklık yükseldikçe, hacimsel verimlilik azalır ve silindir içerisindeki hava akışında bir azalmaya neden olur. Sonuç olarak, normal yanmanın elde edilmesi ulaşılamaz hale geldiğinden duman oluşumu artabilmektedir (Eliçin 2011). Deney yakıtlarının sabit devir (1500 d/dk) farklı motor

yükleri (0.3 bar OEB, 1 bar OEB, 2 bar OEB ve 3 bar OEB) altında duman koyuluğu değerleri ( $\text{m}^{-1}$ ) Şekil 5.8’ de gösterilmiştir.



**Şekil 5.8.** Test yakıtlarının farklı OEB’ ler de duman koyuluğu ( $\text{m}^{-1}$ ) değerleri

0.3 OEB incelendiğinde en yüksek duman koyuluğu  $0,8 (\text{m}^{-1})$  değerine sahip D dizel yakıtında, en düşük duman koyuluğu  $0,3 (\text{m}^{-1})$  değerine sahip DTi100 test yakıtında görülmüştür. DTi25, DTi50 ve DTi75 test yakıtlarındaki duman koyuluğu değerleri sırası ile  $0,7 (\text{m}^{-1})$ ,  $0,6 (\text{m}^{-1})$  ve  $0,5 (\text{m}^{-1})$  olarak görülmüştür.

1 OEB incelendiğinde en yüksek duman koyuluğu  $1 (\text{m}^{-1})$  değerine sahip D dizel yakıtında, en düşük duman koyuluğu  $0,5 (\text{m}^{-1})$  değerine sahip DTi100 test yakıtında görülmüştür. DTi25, DTi50 ve DTi75 test yakıtlarındaki duman koyuluğu değerleri sırası ile  $0,9 (\text{m}^{-1})$ ,  $0,7 (\text{m}^{-1})$  ve  $0,6 (\text{m}^{-1})$  olarak görülmüştür.

2 OEB incelendiğinde en yüksek duman koyuluğu  $1,2 (\text{m}^{-1})$  değerine sahip D ve DTi25 test yakıtlarında, en düşük duman koyuluğu  $0,7 (\text{m}^{-1})$  ile DTi75 ve DTi100 test yakıtında görülmüştür. DTi50 test yakıtındaki duman koyuluğu değeri  $0,9 (\text{m}^{-1})$ , olarak görülmüştür.

3 OEB incelendiğinde en yüksek duman koyuluğu  $1,5 (\text{m}^{-1})$  değerine sahip yakıt D dizel yakıtında, en düşük duman koyuluğu  $1 (\text{m}^{-1})$  ile DTi100 test yakıtında görülmüştür. DTi25, DTi50 ve DTi75 test yakıtlarındaki duman koyuluğu değerleri sırası ile  $1,3 (\text{m}^{-1})$ ,  $1,1 (\text{m}^{-1})$  ve  $1,1 (\text{m}^{-1})$  olarak görülmüştür.



**Çizelge 5.8.** Test yakıtlarının farklı OEB' ler de duman koyuluğu ( $m^{-1}$ ) değerleri

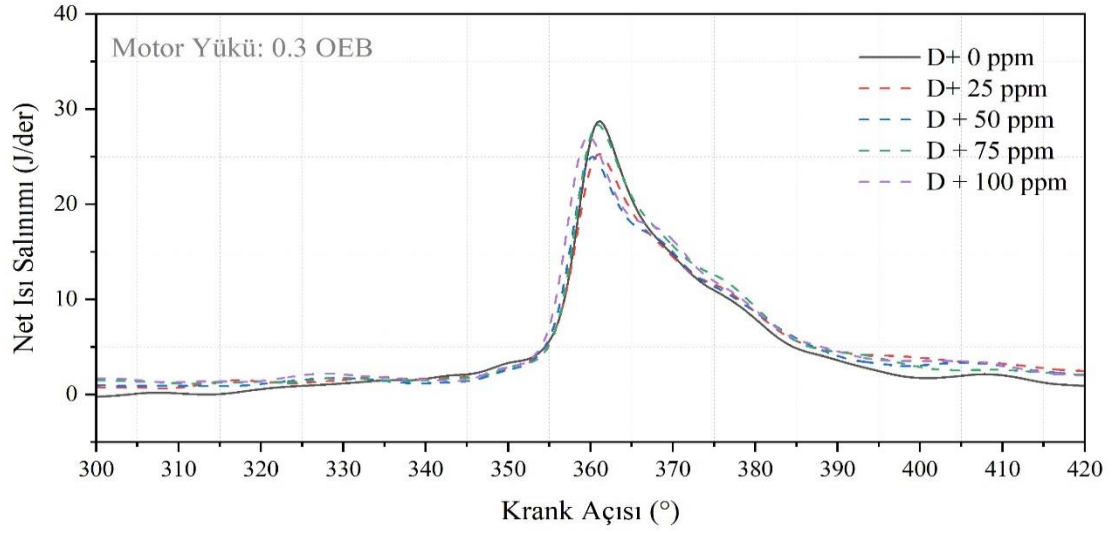
| Yakıt ismi | 0,3 bar OEB | 1 bar OEB | 2 bar OEB | 3 bar OEB | Ortalama değer |
|------------|-------------|-----------|-----------|-----------|----------------|
| D          | 0,8         | 1         | 1,2       | 1,5       | 1,125          |
| DTi25      | 0,7         | 0,9       | 1,2       | 1,3       | 1,025          |
| DTi50      | 0,6         | 0,7       | 0,9       | 1,1       | 0,825          |
| DTi75      | 0,5         | 0,6       | 0,7       | 1,1       | 0,725          |
| DTi100     | 0,3         | 0,5       | 0,7       | 1         | 0,625          |

Deney yakıtı D dizel yakıtına en yakın DTi25 test yakıtı ile arasındaki oransal fark %8,9 olarak bulunmuştur. D dizel test yakıtının DTi50, DTi75 ve DTi100 test yakıt değerleri arasındaki oransal fark sırası ile %26,6, %35,6 ve %44,4 olarak görülmüştür. Şekil 5.8 ve çizelge 5.8 incelendiğinde motor yükü arttırıldıkça aynı oranda motora giren yakıt artacağı için duman koyuluğu da paralel bir şekilde artmıştır. Karışımli test yakıtları D dizel yakıtından daha fazla oksijen içeriğine sahip olduğu için hava/yakıt oranının artması fakir karışıma sebebiyet verecektir. Bu yüzden duman koyuluğu karışımli test yakıtlarında daha az olduğu gözlenmiştir.

### 5.3. Yanma Analizi

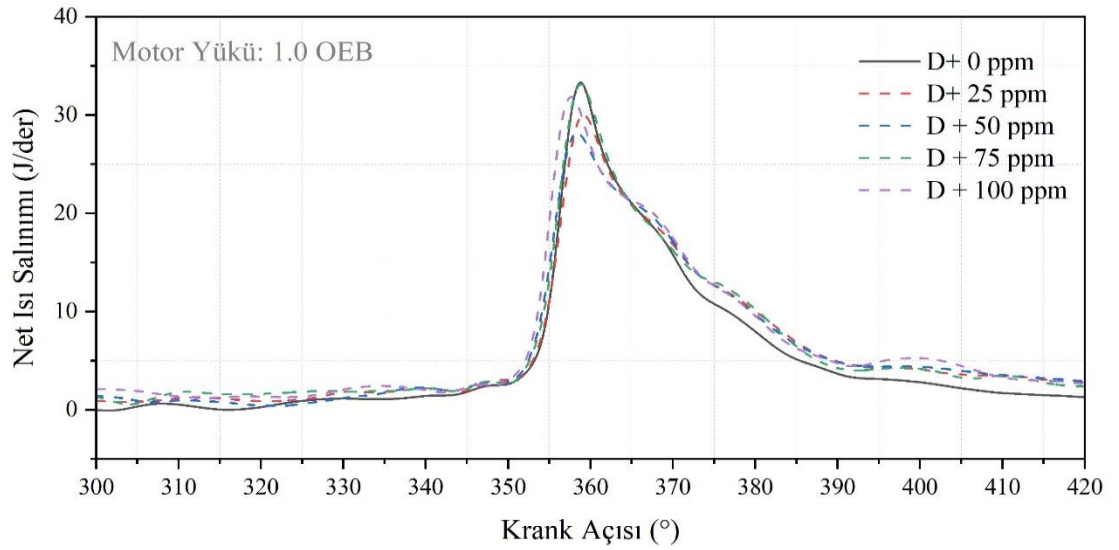
#### 5.3.1. Net ısı salınımı

Deney yakıtlarının sabit devir (1500 d/dk) farklı motor yükleri altında (0.3 bar OEB, 1 bar OEB, 2 bar OEB ve 3 bar OEB) krank açısına bağlı olarak Şekil 5.9, Şekil 5.10, Şekil 5.11 ve Şekil 5.12 net ısı salınım değerleri (J/der) gösterilmiştir.



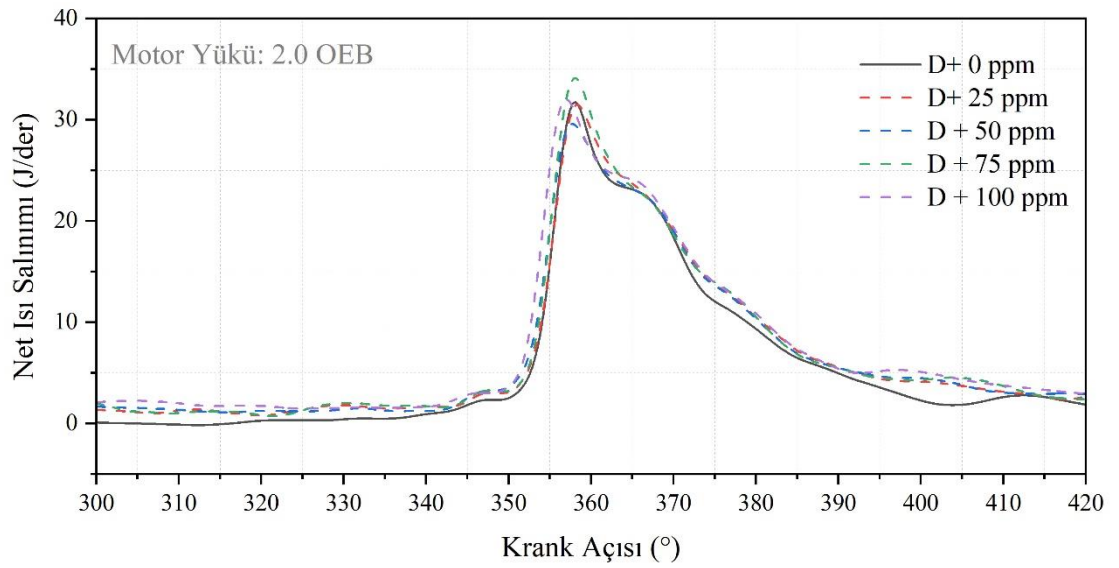
**Şekil 5.9.** Test yakıtları net ısı salınımının krank açısına bağlı değişimleri (0.3 bar OEB)

0.3 bar OEB yükü ile analiz edildiğinde  $361^{\circ}$  krank mili açısında net ısı salınım değerleri en yüksek D, DTi75, DTi25, DTi100 ve DTi50 test yakıtları için sırasıyla 29,27 kJ, 28,75 kJ, 25,65 kJ, 25,62 kJ ve 24,56 kJ olduğu görülmektedir. Maksimum net ısı salınım değeri D dizel test yakıtının minimum DTi50 test yakıtı ile arasındaki oransal fark %16,09 olarak bulunmuştur. Deney yakıtı D dizel yakıtına en yakın DTi75 test yakıtı ile arasında ki oransal fark %1,77 olarak bulunmuştur.



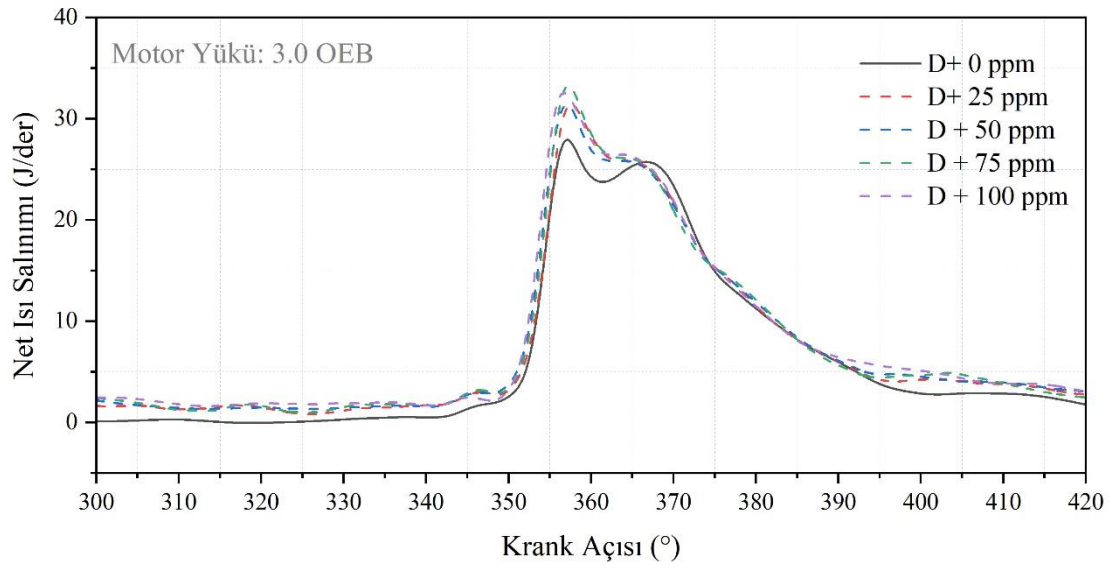
**Şekil 5.10.** Test yakıtları net ısı salınımının krank açısına bağlı değişimleri (1 bar OEB)

1 bar OEB yükü ile analiz edildiğinde 359<sup>0</sup> krank mili açısında net ısı salınım değerleri en yüksek D, DTi75, DTi25, DTi100 ve DTi50 test yakıtları için sırasıyla 33,96 kj, 33,59 kj, 30,53 kj, 29,8 kj ve 28 kj olduğu görülmektedir. Maksimum net ısı salınım değeri D dizel test yakıtının minimum DTi50 test yakıtı ile arasındaki oransal fark %17,55 olarak bulunmuştur. Deney yakıtı D dizel yakıtına en yakın DTi75 test yakıtı ile arasında ki oransal fark %1,08 olarak bulunmuştur.



**Şekil 5.11.** Test yakıtları net ısı salınımının krank açısına bağlı değişimleri (2 bar OEB)

2 bar OEB yükü ile analiz edildiğinde 358<sup>0</sup> krank mili açısında net ısı salınım değerleri en yüksek DTi75, D, DTi25, DTi100 ve DTi50 test yakıtları için sırasıyla 34,67 kj, 32,44 kj, 31,9 kj, 31,01 kj ve 29,79 kj olduğu görülmektedir. Maksimum net ısı salınım değeri DTi75 test yakıtının minimum DTi50 test yakıtı ile arasındaki oransal fark %14,07 olarak bulunmuştur. En yüksek net ısı salınım değerine sahip DTi75 test yakıtının D dizel test yakıtına oransal farkı %6,43 olarak bulunmuştur.



**Şekil 5.12.** Test yakıtları net ısı salınımının krank açısına bağlı değişimleri (3 bar OEB)

3 bar OEB yükü ile analiz edildiğinde 357<sup>0</sup> krank mili açısında net ısı salınım değerleri en yüksek DTi75, DTi100, DTi50, DTi25 ve D test yakıtları için sırasıyla 33,84 kj, 32,75 kj, 31,87 kj, 31,56 kj ve 28,42 kj olduğu görülmektedir. Maksimum net ısı salınım değeri DTi75 test yakıtının minimum D dizel test yakıtı ile arasındaki oransal fark %16,01 olarak bulunmuştur.

**Çizelge 5.9.** Farklı yüklerdeki yakıtların maksimum net ısı salınım değerleri (kJ/der)

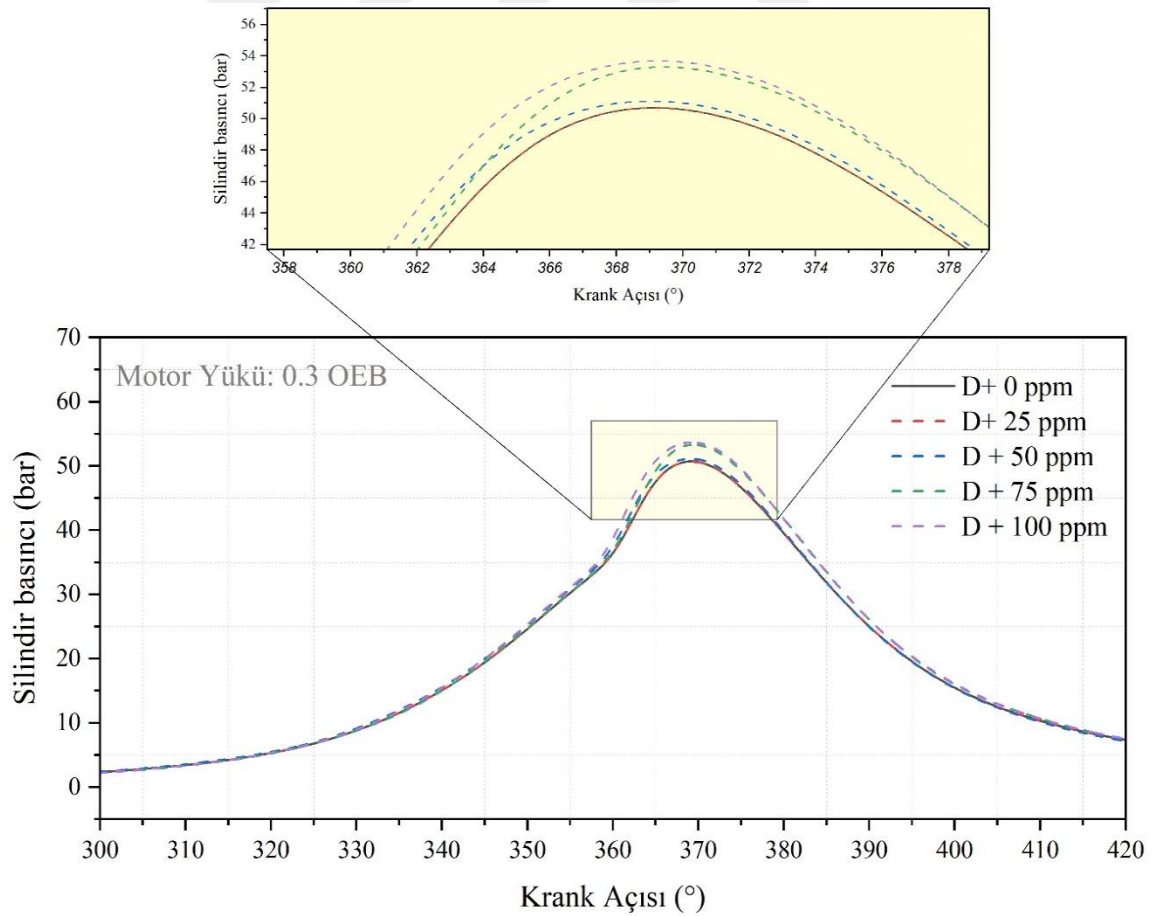
| Yakıt ismi | 0,3 bar OEB            | 1 bar OEB              | 2 bar OEB              | 3 bar OEB              |
|------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| D          | 29,27/361 <sup>0</sup> | 33,96/359 <sup>0</sup> | 32,44/358 <sup>0</sup> | 28,42/357 <sup>0</sup> |
| DTi25      | 25,65/361 <sup>0</sup> | 30,53/359 <sup>0</sup> | 31,9/358 <sup>0</sup>  | 31,56/357 <sup>0</sup> |
| DTi50      | 24,56/361 <sup>0</sup> | 28/359 <sup>0</sup>    | 29,79/358 <sup>0</sup> | 31,87/357 <sup>0</sup> |
| DTi75      | 28,75/361 <sup>0</sup> | 33,59/359 <sup>0</sup> | 34,67/358 <sup>0</sup> | 33,84/357 <sup>0</sup> |
| DTi100     | 25,62/361 <sup>0</sup> | 29,8/359 <sup>0</sup>  | 31,01/358 <sup>0</sup> | 32,75/357 <sup>0</sup> |

Net ısı salınımına ait şekiller ve Çizelge 5.9 incelendiğinde motor yükü arttıkça genel olarak net ısı salımında artış gözlemlenirken, D dizel test yakıtının 2 bar OEB'den sonra azaldığı, DTi25 ve DTi75 test yakıtlarında ise 3 bar OEB'de bir miktar azalma gözlenmiştir. 0,3 bar OEB, 1 bar OEB ve 2 bar OEB' de en düşük net ısı salınım değeri DTi50 karışımli test yakıtı gözlenirken 3 bar OEB' de en düşük net ısı salınım değeri D dizel test yakıtına aittir. En yüksek net ısı salınım değeri ise 0,3 bar OEB ve 1 bar OEB

de D dizel test yakıtı, 2 bar OEB ve 3 bar OEB' de DTi75 karışımli test yakıtında gözlenmiştir. Bütün deney yakıtları içerisinde net ısı salınım değeri en yüksek DTi75 test yakıtında en düşük net ısı salınım değeri ise DTi50 test yakıtında gözlenmiştir. Yüksek yüklerde maksimum ısı salınımının dizel yakıtı oranla karışımli yakıtlarda daha fazla olduğu bunun nedeninin dizel yakıtına göre düşük setan sayısına sahip olup tutuşma gecikmesinin uzamasına bağılı olarak daha fazla yakıtın silindir içerisinde alındıktan sonra yanma işlemlerinin ani olarak oluşması ısı salınımını daha yüksekler çıkmasına neden olduğu değerlendirilmektedir.

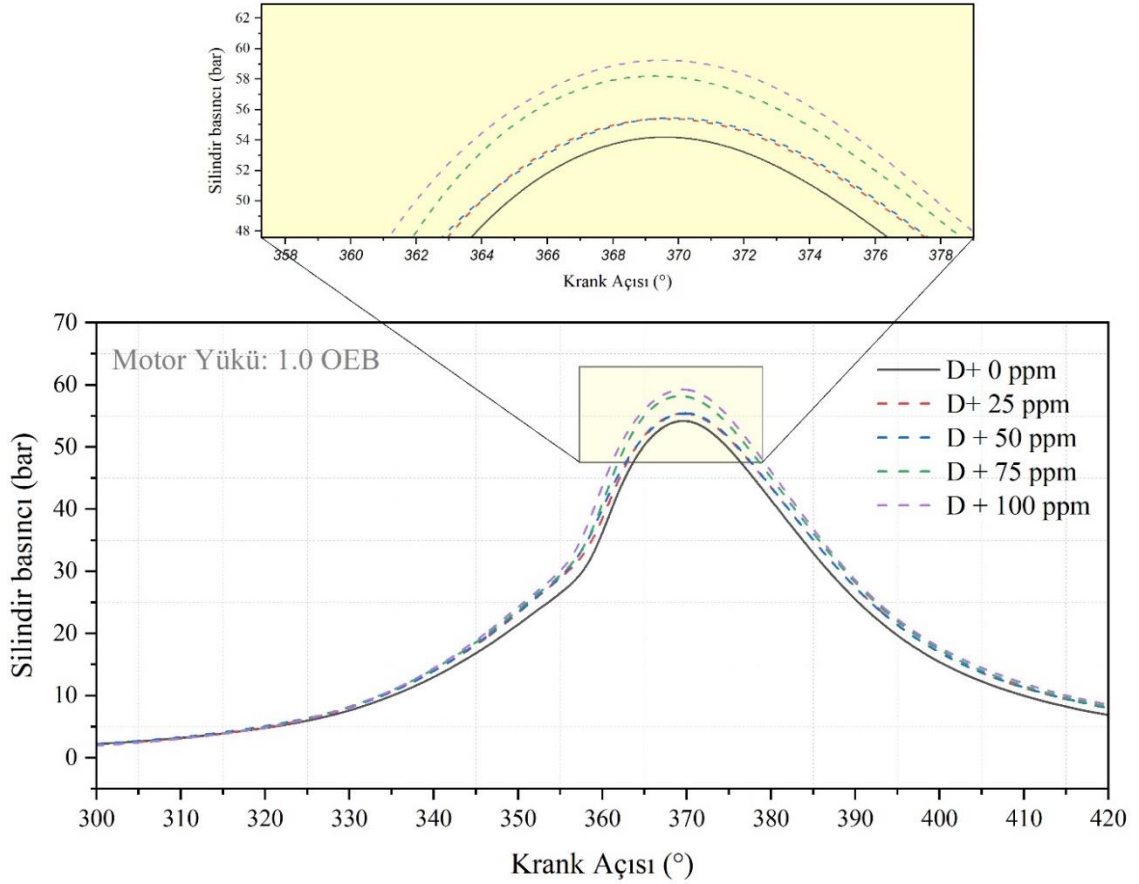
### 5.3.2. Silindir basıncı

Deney yakıtlarının sabit devir (1500 d/dk) farklı motor yükleri altında (0.3 bar OEB, 1 bar OEB, 2 bar OEB ve 3 bar OEB) krank açısına bağılı olarak Şekil 5.13, Şekil 5.14 Şekil 5.15 ve Şekil 5.16'da silindir basıncı (bar) gösterilmiştir.



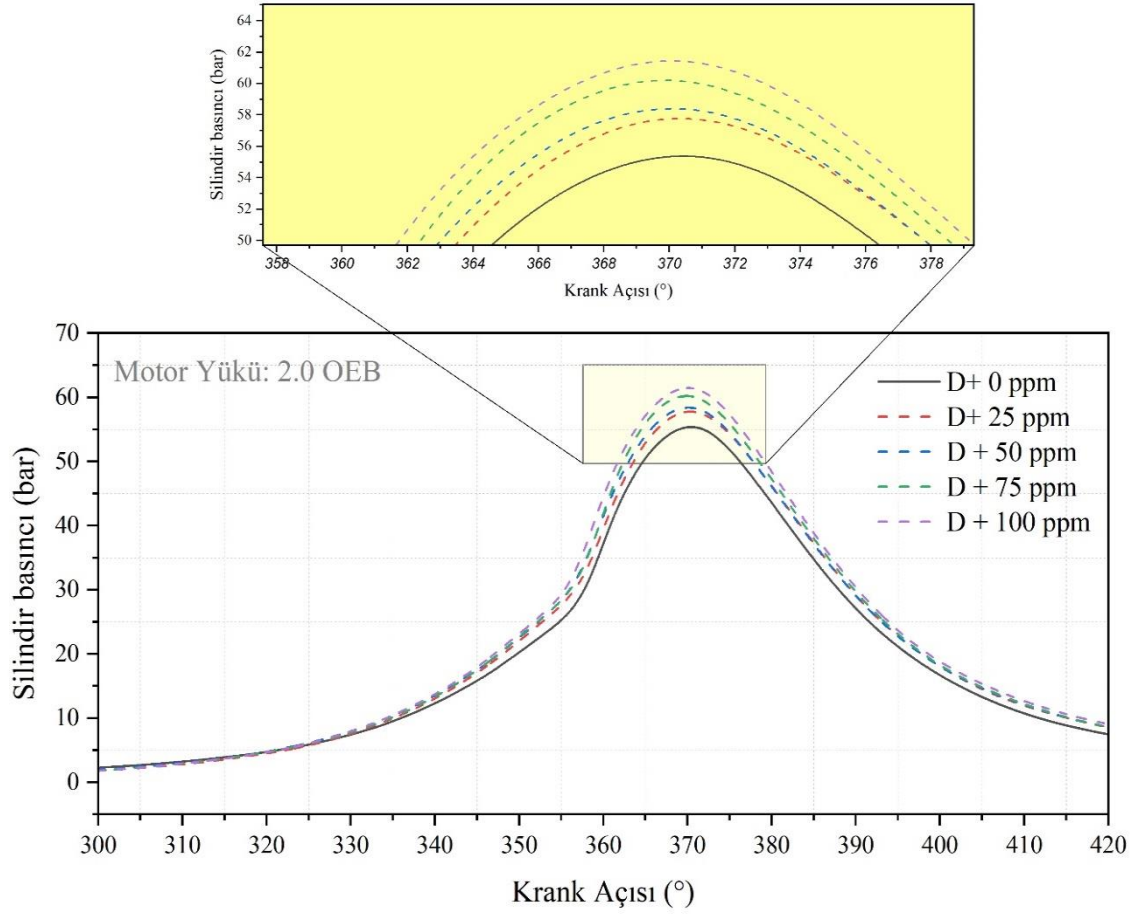
Şekil 5.13. 0.3 bar OEB göre krank açısına bağılı silindir basıncı (bar)

0.3 bar OEB yükü ile analiz edildiğinde  $369^0$  krank mili açısında silindir basıncı en yüksek DTi100, DTi75, DTi50, DTi25 ve D test yakıtları için sırasıyla 53,71 bar, 53,32 bar, 51,15 bar, 50,74 bar ve 50,74 bar olduğu görülmektedir. Maksimum net ısı salınım değeri DTi100 test yakıtının minimum D dizel test yakıtı ile arasındaki oransal fark %5,52 olarak bulunmuştur.



**Şekil 5.14.** 1 bar OEB göre krank açısına bağlı silindir basıncı (bar)

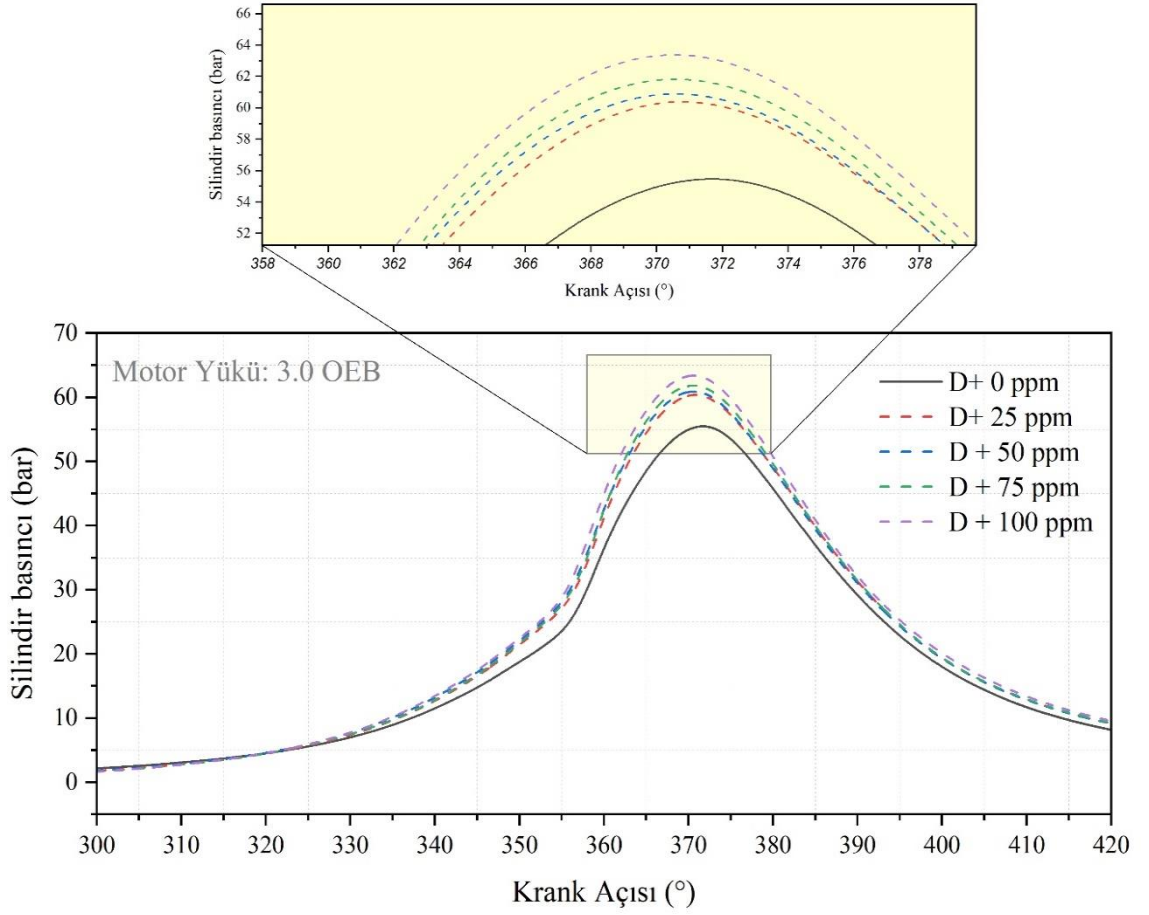
1 bar OEB yükü ile analiz edildiğinde  $370^0$  krank mili açısında silindir basıncı en yüksek DTi100, DTi75, DTi50, DTi25 ve D test yakıtları için sırasıyla 59,26 bar, 58,16 bar, 55,49 bar, 55,41 bar ve 54,21 bar olduğu görülmektedir. Maksimum net ısı salınım değeri DTi100 test yakıtının minimum D dizel test yakıtı ile arasındaki oransal fark %8,52 olarak bulunmuştur.



Şekil 5.15. 2 bar OEB göre krank açısına bağlı silindir basıncı (bar)

2 bar OEB yükü ile analiz edildiğinde  $370^0$  krank mili açısında silindir basıncı en yüksek DTi100, DTi75, DTi50, DTi25 ve D test yakıtları için sırasıyla 61,49 bar, 60,25 bar, 58,44 bar, 57,8 bar ve 55,39 bar olduğu görülmektedir. Maksimum net ısı salınım değeri DTi100 test yakıtının minimum D dizel test yakıtı ile arasındaki oransal fark %9,92 olarak bulunmuştur.





**Şekil 5.16.** 3 bar OEB göre krank açısına bağlı silindir basıncı (bar)

3 bar OEB yükü ile analiz edildiğinde 371<sup>0</sup> krank mili açısında silindir basıncı en yüksek DTi100, DTi75, DTi50, DTi25 ve D test yakıtları için sırasıyla 63,39 bar, 61,84 bar, 60,91 bar, 60,43 bar ve 55,44 bar olduğu görülmektedir. Maksimum net ısı salınım değeri DTi100 test yakıtının minimum D dizel test yakıtı ile arasındaki oransal fark %12,54 olarak bulunmuştur.

**Çizelge 5.10.** Farklı yüklerdeki yakıtların maksimum basınç değerleri (bar/der)

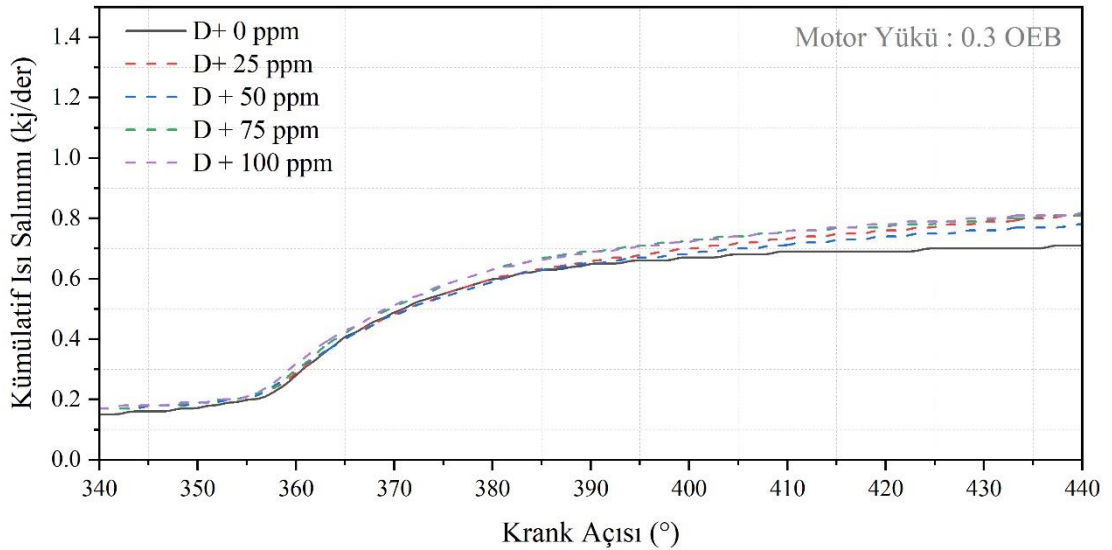
| Yakıt ismi | 0,3 bar OEB            | 1 bar OEB              | 2 bar OEB              | 3 bar OEB              |
|------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| D          | 50,74/369 <sup>0</sup> | 54,21/370 <sup>0</sup> | 55,39/370 <sup>0</sup> | 55,44/371 <sup>0</sup> |
| DTi25      | 50,74/369 <sup>0</sup> | 55,41/370 <sup>0</sup> | 57,8/370 <sup>0</sup>  | 60,43/371 <sup>0</sup> |
| DTi50      | 51,15/369 <sup>0</sup> | 55,49/370 <sup>0</sup> | 58,44/370 <sup>0</sup> | 60,91/371 <sup>0</sup> |
| DTi75      | 53,32/369 <sup>0</sup> | 58,16/370 <sup>0</sup> | 60,25/370 <sup>0</sup> | 61,84/371 <sup>0</sup> |
| DTi100     | 53,79/369 <sup>0</sup> | 59,26/370 <sup>0</sup> | 61,49/370 <sup>0</sup> | 63,39/371 <sup>0</sup> |



Tüm şekiller ve Çizelge 5.10 incelediğinde motor yükünün arttırılması silindir içerisine fazla yakıt alacağından dolayı basıncın da artacağını göstermektedir. Silindir basıncının en yüksek olduğu değer 3 bar OEB’ de DTi100 test yakıtı, en düşük silindir basıncının olduğu değer ise 0,3 bar OEB’ de D ve DTi25 test yakıtlarında gözlenmiştir. Yakıtı eklenen TiO<sub>2</sub> nano-madde miktarına bağlı olarak basınçta sürekli artış gözlenmiştir.

### 5.3.3. Kümülatif ısı salınımı

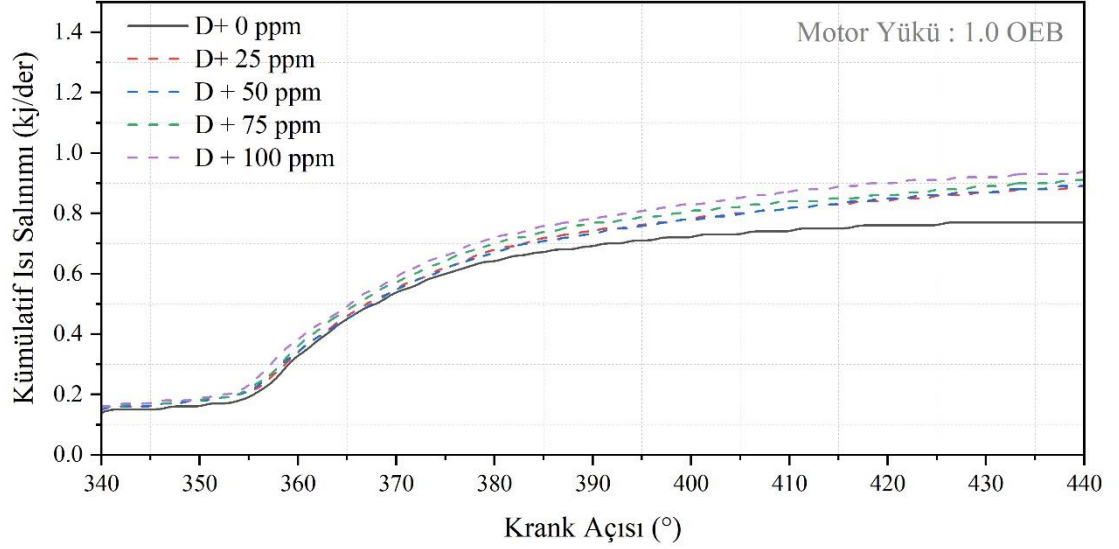
Yanma odalarında yanma sırasında açığa çıkan toplam ısı enerjisi, krank mili açısına göre değişen, silindirdeki yanma işlemi olarak tanımlanabilir. Deney yakıtları için elde edilen D, DTi25, DTi50, DTi75 ve DTi100 karışımlı yakıtlar farklı motor yükleri (0,3 bar OEB, 1 bar OEB, 2 bar OEB ve 3 bar OEB) ve sabit devir sayısı ile (1500 d/dk) ölçümü yapılarak Şekil 5.17, Şekil 5.18, Şekil 5.19 ve Şekil 5.20’de kümülatif ısı salınım değerleri krank mili açısına göre değişimleri kJ/der cinsinden verilmiştir.



**Şekil 5.17.** Test yakıtları kümülatif ısı salınımının krank açısına bağlı değişimleri (0.3 bar OEB)

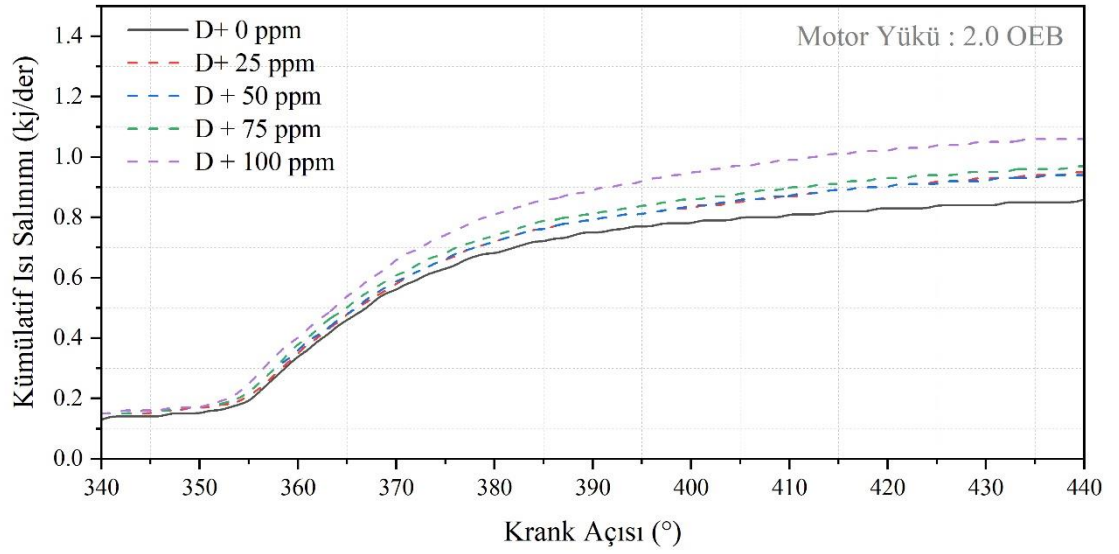
Yüklü olmayan (0,3 bar OEB)’ye göre maksimum kümülatif ısı salınımı yanmanın gerçekleşmesinden sonra 464-477<sup>0</sup> krank açısı aralığında DTi25 ile 0,84 kJ olup, en düşük toplam ısı salınımı ise D test yakıtı ile 0,71 kJ olarak gerçekleşmiştir. En

yüksek DTi25 yakıtı kümülatif ısı salınım değeri ile en düşük D kümülatif ısı salınım değeri arasındaki oransal fark % 15,47 olarak tespiti yapılmıştır.



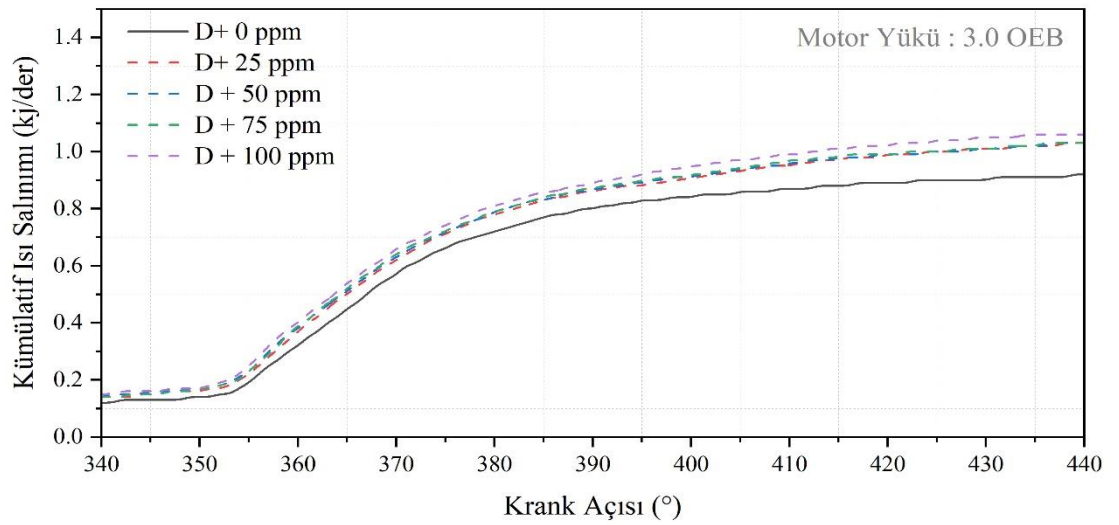
**Şekil 5.18.** Test yakıtları kümülatif ısı salınımının krank açısına bağlı değişimleri (1 bar OEB)

1 bar OEB'ye göre maksimum kümülatif ısı salınımı yanmanın gerçekleşmesinden sonra 448-478<sup>0</sup> krank açısı aralığında DTi100 ile 0,95 kJ olup, en düşük toplam ısı salınımı ise D test yakıtı ile 0,78 kJ olarak gerçekleşmiştir. En yüksek DTi100 yakıtı kümülatif ısı salınım değeri ile en düşük D kümülatif ısı salınım değeri arasındaki oransal fark % 17,89 olarak tespiti yapılmıştır.



**Şekil 5.19.** Test yakıtları kümülatif ısı salınımının krank açısına bağlı değişimleri (2 bar OEB)

2 bar OEB'ye göre maksimum kümülatif ısı salınımı yanmanın gerçekleşmesinden sonra 442-475<sup>0</sup> krank açısı aralığında DTi100 ile 1,07 kJ olup, en düşük toplam ısı salınımı ise D test yakıtı ile 0,88 kJ olarak gerçekleşmiştir. En yüksek DTi100 yakıtı kümülatif ısı salınım değeri ile en düşük D kümülatif ısı salınım değeri arasındaki oransal fark % 17,75 olarak tespiti yapılmıştır.



**Şekil 5.20.** Test yakıtları kümülatif ısı salınımının krank açısına bağlı değişimleri (3 bar OEB)

3 bar OEB'ye göre maksimum kümülatif ısı salınımı yanmanın gerçekleşmesinden sonra 442-475<sup>0</sup> krank açısı aralığında DTi100 ile 1,07 kJ olup, en düşük toplam ısı salınımı ise D test yakıtı ile 0,92 kJ olarak gerçekleşmiştir. En yüksek DTi100 yakıtı kümülatif ısı salınım değeri ile en düşük D kümülatif ısı salınım değeri arasındaki oransal fark % 14,01 olarak tespiti yapılmıştır.

Farklı yüklerdeki yakıtlar için kümülatif ısı salınım değerleri (kJ/der) Çizelge 5.3' de verilmiştir.

**Çizelge 5.11.** Farklı yüklerdeki yakıtların maksimum kümülatif ısı salınım değerleri (kJ/der)

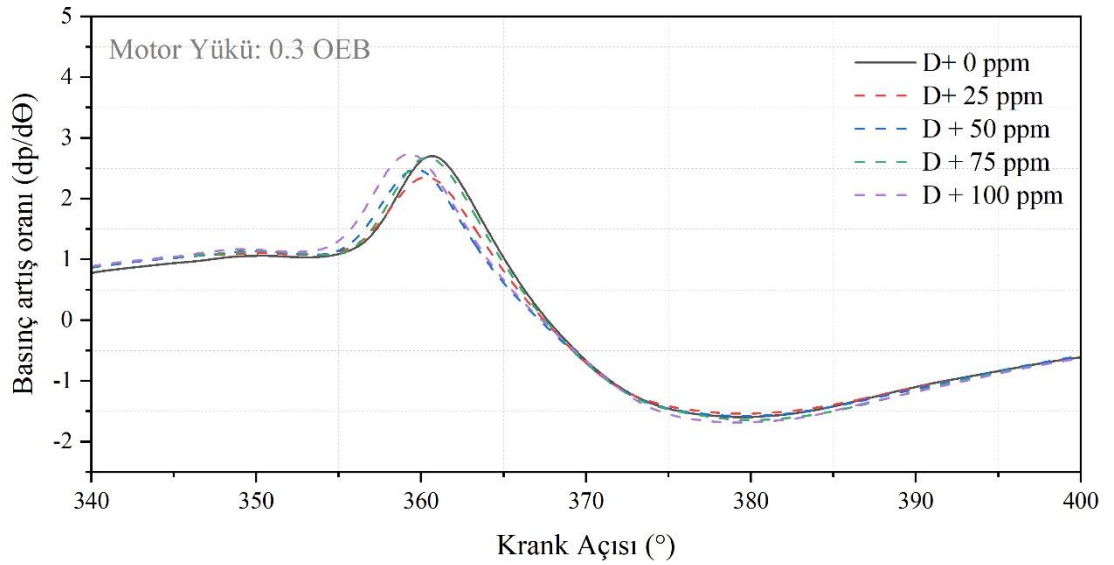
| Yakıt ismi | 0,3 bar OEB   | 1 bar OEB      | 2 bar OEB     | 3 bar OEB     |
|------------|---------------|----------------|---------------|---------------|
| D          | 0,71/464-477° | 0,78/448-477°  | 0,86/442-475° | 0,93/442-475° |
| DTi25      | 0,84/464-477° | 0,92/448-477°  | 0,96/442-475° | 1,05/442-475° |
| DTi50      | 0,8/464-477°  | 0,91/448-4477° | 0,97/442-475° | 1,05/442-475° |
| DTi75      | 0,82/464-477° | 0,92/448-477°  | 0,98/442-475° | 1,06/442-475° |
| DTi100     | 0,83/464-477° | 0,95/448-477°  | 1,07/442-475° | 1,07/442-475° |

Çizelge 5.11 ve şekiller analiz edildiğinde tüm test yakıtlarında yüke bağlı artış sonucunda kümülatif ısı salınım değerinde artış gözlenmiştir. 0,3 bar OEB de D test yakıtı en düşük kümülatif ısı salınım değeri elde edilirken en yüksek kümülatif ısı salınım değeri DTi25 test yakıtında ise en yüksek değer elde edilmiştir. DTi50, DTi75, test yakıtlarında ise sırası ile düşüş gözlenmiş ve ardından DTi100 test yakıtı değerinde bir miktar artış olmuştur. D dizel test yakıtının 1 bar OEB yükü altında en düşük değere sahip olduğu ve bu yakıtı en yakın test yakıtı DTi50 karışımı olduğu tespit edilmiştir. En yüksek kümülatif ısı salınım değeri DTi100 test yakıtında elde edilmiştir. DTi25 ve DTi75 test yakıtlarında ise eşit değer gözlenmiştir. D dizel test yakıtının 2 bar OEB yükü altında en düşük değere sahip olduğu ve bu yakıtı en yakın test yakıtı DTi25 karışımı olduğu tespit edilmiştir. En yüksek kümülatif ısı salınım değeri DTi100 test yakıtında elde edilmiştir. DTi50 ve DTi75 test yakıtlarında ise sırası ile değerinde artış gözlenmiştir. D dizel test yakıtının 3 bar OEB yükü altında en düşük değere sahip olduğu ve bu yakıtı en yakın test yakıtı DTi25 ve DTi50 karışımları olduğu tespit edilmiştir. En yüksek kümülatif ısı salınım değeri DTi100 test yakıtında elde edilmiştir. DTi75 test yakıtı değerinde ise D dizel yakıtı oranla bir miktar artış gözlenmiştir. Elde edilen bu verilere göre tutuşma gecikmesine bağlı olarak ek katkı maddeli test yakıtının silindir içerisinde yanmaya dahil olması ve yoğunluğunun dizel yakıtı oranla daha yüksek olduğu, yükün artırılması ile

silindir içindeki basıncın artması yoğunluğu daha yüksek olan nano partikül katkılı test yakıtlarının havanın içinde daha iyi bir şekilde atomize olması ve bu yakıtların ısı enerjisine dönüşümünde artış dizel test yakıtına kıyasla daha yüksek çıkmıştır.

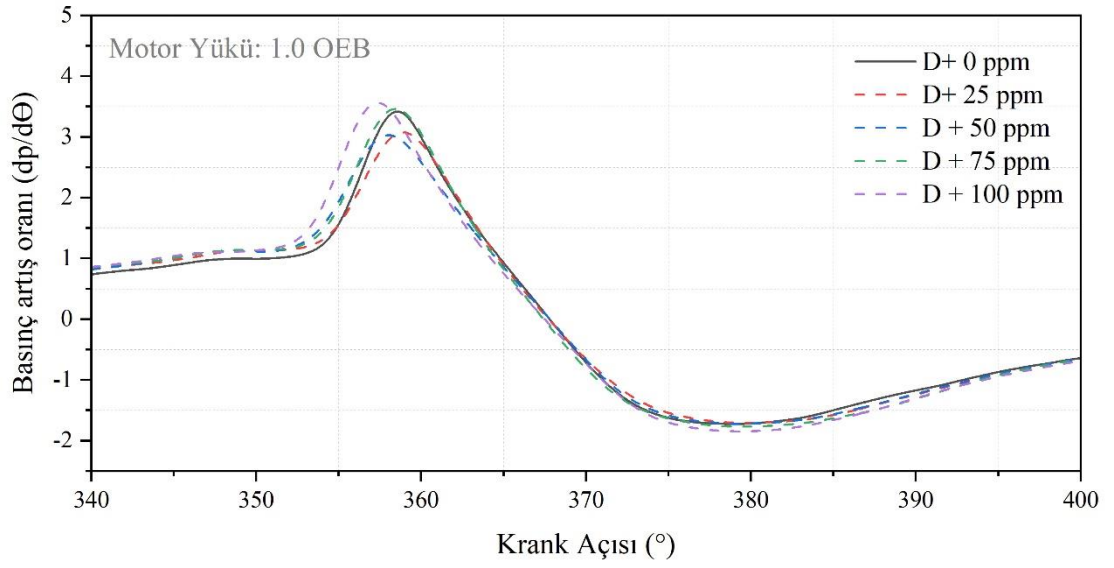
#### 5.3.4. Basınç artış oranı

Deney yakıtlarının sabit devir (1500 d/dk) farklı motor yükleri altında (0.3 bar OEB, 1 bar OEB, 2 bar OEB ve 3 bar OEB) krank açısına bağlı olarak Şekil 5.21, Şekil 5.22, Şekil 5.23 ve Şekil 5.24’de basınç artış oranı ( $dp/d\theta$ ) gösterilmiştir.



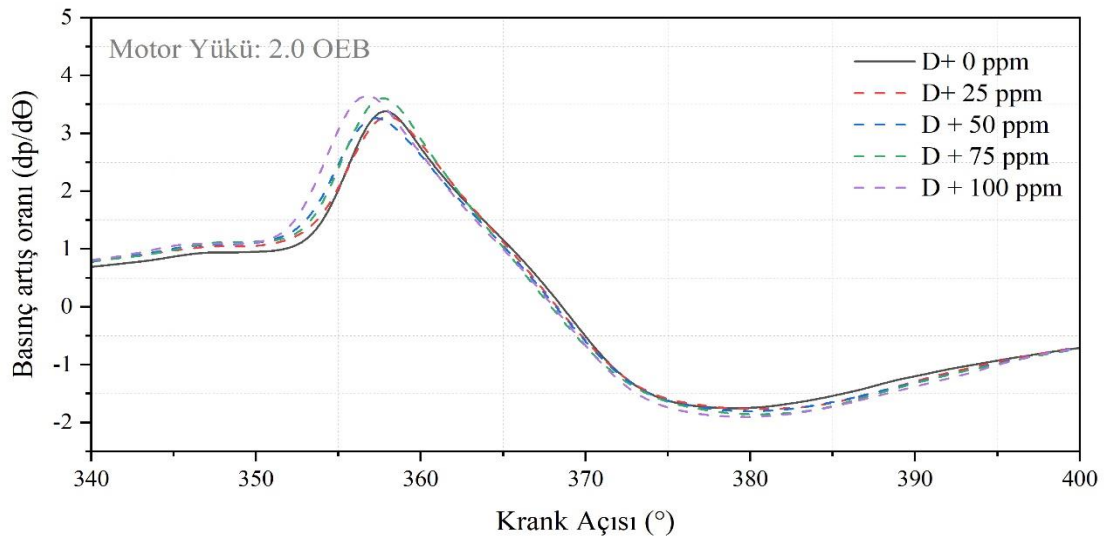
Şekil 5.21. 0,3 bar OEB göre krank açısına bağlı basınç artış oranı ( $dp/d\theta$ )

0,3 bar OEB yükü ile analiz edildiğinde 359° krank mili açısında basınç artış oranı en yüksek DTi100, DTi50, DTi75, D ve DTi25 test yakıtları için sırasıyla 2,78, 2,45, 2,41, 2,28 ve 2,16 olduğu görülmektedir. Maksimum basınç artış oranı DTi100 test yakıtında minimum basınç artış oranı ise DTi25 test yakıtında gözlenmiş olup iki değer arasındaki oransal fark %22,30 olarak tespit edilmiştir. D dizel test yakıtına en yakın DTi25 test yakıtı ile oransal fark %5,26 olarak bulunmuştur.



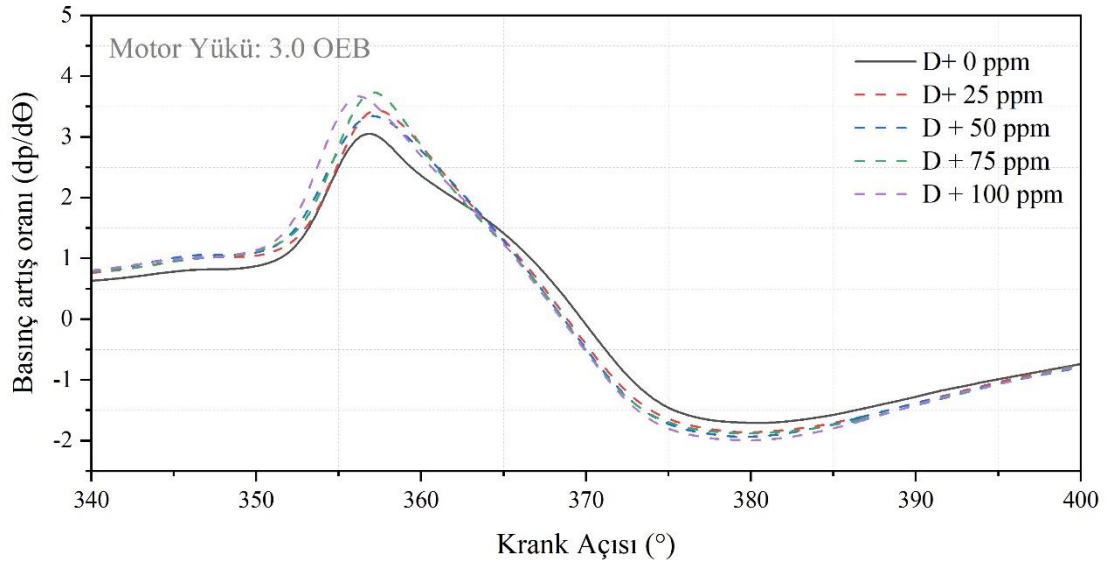
**Şekil 5.22.** 1 bar OEB göre krank açısına bağlı basınç artış oranı ( $dp/d\theta$ )

1 bar OEB yükü ile analiz edildiğinde  $357^0$  krank mili açısında basınç artış oranı en yüksek DTi100, DTi75, DTi50, D ve DTi25 test yakıtları için sırasıyla 3,61, 3,1, 2,91, 2,88 ve 2,54 olduğu görülmektedir. Maksimum basınç artış oranı DTi100 test yakıtında minimum basınç artış oranı ise DTi25 test yakıtında gözlenmiş olup iki değer arasındaki oransal fark %29,63 olarak tesit edilmiştir. D dizel test yakıtına en yakın DTi50 test yakıtı ile oransal fark %1,03 olarak bulunmuştur.



**Şekil 5.23.** 2 bar OEB göre krank açısına bağlı basınç artış oranı ( $dp/d\theta$ )

2 bar OEB yükü ile analiz edildiğinde  $357^0$  krank mili açısında basınç artış oranı en yüksek DTi100, DTi75, DTi50, D ve DTi25 test yakıtları için sırasıyla 3,7, 3,57, 3,31, 3,29 ve 3,16 olduğu görülmektedir. Maksimum basınç artış oranı DTi100 test yakıtında minimum basınç artış oranı ise DTi25 test yakıtında gözlenmiş olup iki değer arasındaki oransal fark %14,59 olarak tespit edilmiştir. D dizel test yakıtına en yakın DTi50 test yakıtı ile oransal fark %0,6 olarak bulunmuştur.



**Şekil 5.24.** 3 bar OEB göre krank açısına bağlı basınç artış oranı ( $dp/d\theta$ )

3 bar OEB yükü ile analiz edildiğinde  $357^0$  krank mili açısında basınç artış oranı en yüksek DTi75, DTi100, DTi25, DTi50 ve D test yakıtları için sırasıyla 3,8, 3,6, 3,48, 3,38 ve 3,1 olduğu görülmektedir. Maksimum basınç artış oranı DTi75 test yakıtında minimum basınç artış oranı ise D dizel test yakıtında gözlenmiş olup iki değer arasındaki oransal fark %18,42 olarak tespit edilmiştir.



**Çizelge 5.12.** Farklı yüklerdeki yakıtların maksimum basınç artış oranı (dp/dø)

| Yakıt ismi | 0,3 bar OEB           | 1 bar OEB             | 2 bar OEB             | 3 bar OEB             |
|------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| D          | 2,28/359 <sup>0</sup> | 2,88/357 <sup>0</sup> | 3,29/357 <sup>0</sup> | 3,1/357 <sup>0</sup>  |
| DTi25      | 2,16/359 <sup>0</sup> | 2,54/357 <sup>0</sup> | 3,16/357 <sup>0</sup> | 3,48/357 <sup>0</sup> |
| DTi50      | 2,45/359 <sup>0</sup> | 2,91/357 <sup>0</sup> | 3,31/357 <sup>0</sup> | 3,38/357 <sup>0</sup> |
| DTi75      | 2,41/359 <sup>0</sup> | 3,1/357 <sup>0</sup>  | 3,57/357 <sup>0</sup> | 3,8/357 <sup>0</sup>  |
| DTi100     | 2,78/359 <sup>0</sup> | 3,61/357 <sup>0</sup> | 3,7/357 <sup>0</sup>  | 3,6/357 <sup>0</sup>  |

Tüm şekiller ve Çizelge 5.12 incelediğinde motor yükünün arttırılması silindir içerisine fazla yakıt alacağından dolayı basınç artış oranının da artacağını göstermektedir. DTi25 karışımli test yakıtı 0,3 bar OEB, 1 bar OEB ve 2 bar OEB motor yüklerinde diğer test yakıtlarına göre en düşük değer olarak gözlenirken 3 bar OEB motor yükünde bir miktar artış gözlenmiştir. DTi25 karışımli test yakıtının basınç artış oranının düşük kalması tutuşma gecikme zamanının daha kısa sürmesine ve bundan dolayı daha kontrollü bir yanma olacağı değerlendirilmektedir.

#### 5.4. Yüzey Yanıt Yöntemi (Yym) Metodu

Yaptığımız bu çalışmada optimum TiO<sub>2</sub> miktarı (ppm) ve motor yükü (bar) parametrelerini belirlemek ve bu seviyelere eşdeğer optimum EV, ÖYT, ÖET, EGS, CO NO<sub>x</sub>, HC ve Duman yanıtlarını belirlemek için YYM uygulanmıştır. Çizelge 5.13' de giriş parametreleri gösterilmiştir.

**Çizelge 5.12.** YYM için giriş parametreleri ve seviyeler

| Model             | İki faktör ve beş yanıt                                |
|-------------------|--------------------------------------------------------|
| Metod             | Merkezi kompozit tam faktöriyel tasarım                |
| Sürekli faktörler | Nanopartikül miktarı & Fren ortalama etkili basıncı    |
| NP (ppm)          | 0; 25; 50; 75; 100                                     |
| BMEP (bar)        | 0.3; 1.0; 2.0; 3.0; -                                  |
| Yanıtlar          | EV, FÖET, FÖYT, EGS, CO, No <sub>x</sub> , HC ve duman |
| Şartlar           | Tam karesel 95%                                        |

Bu tez çalışmasında kullanılan girdi parametreleri kullanılan yöntemler şekil 5.25'de gösterilmektedir.



## Central Composite Design

## Design Summary

Factors: 2 Replicates: 1  
 Base runs: 13 Total runs: 13  
 Base blocks: 1 Total blocks: 1

$\alpha = 1,41421$

Two-level factorial: Full factorial

## Point Types

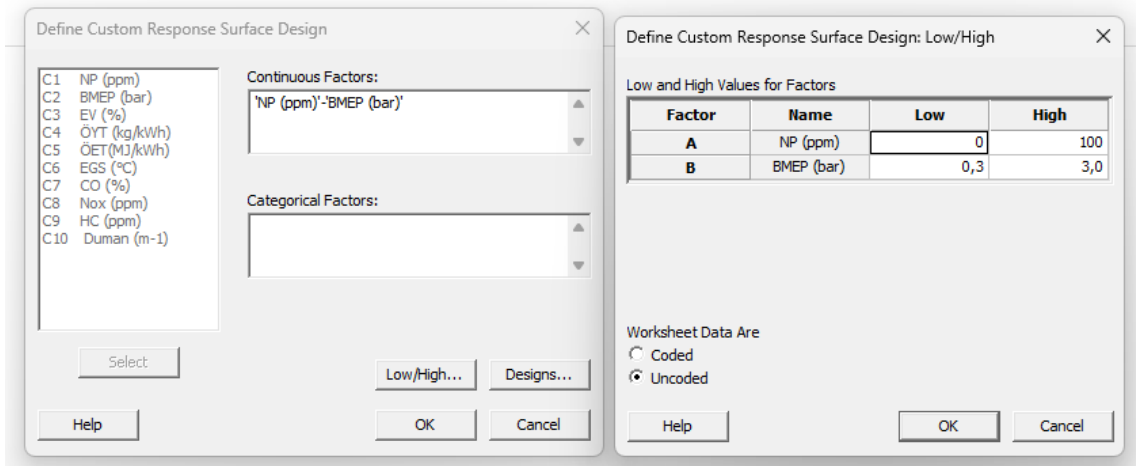
Cube points: 4  
 Center points in cube: 5  
 Axial points: 4  
 Center points in axial: 0

Şekil 5.25. Merkezi karma tasarım (CCD) yöntemi ile girdi parametreleri

Çizelge 5.13. Farklı motor yükü ve  $\text{TiO}_2$  miktarına karşılık gelen deneysel sonuçlar

| Durum | NP (ppm) | BMEP (bar) | EV (%) | ÖYT (kg/kWh) | ÖET (MJ/kWh) | EGS (°C) | CO (%) | No <sub>x</sub> (ppm) | HC (ppm) | Duman (m <sup>-1</sup> ) |
|-------|----------|------------|--------|--------------|--------------|----------|--------|-----------------------|----------|--------------------------|
| 1     | 0        | 0,3        | 1,3    | 6,14         | 267,5        | 84,0     | 0,05   | 67                    | 35       | 0,8                      |
| 2     | 0        | 1          | 5,0    | 1,65         | 72,0         | 122,0    | 0,06   | 157                   | 37       | 1                        |
| 3     | 0        | 2          | 9,6    | 0,86         | 37,7         | 145,0    | 0,07   | 219                   | 40       | 1,2                      |
| 4     | 0        | 3          | 13,4   | 0,61         | 26,8         | 172,0    | 0,09   | 312                   | 42       | 1,5                      |
| 5     | 25       | 0,3        | 1,3    | 6,2          | 268,8        | 89,0     | 0,04   | 82                    | 30       | 0,7                      |
| 6     | 25       | 1          | 5,1    | 1,6          | 69,9         | 126,0    | 0,06   | 200                   | 27       | 0,9                      |
| 7     | 25       | 2          | 9,7    | 0,9          | 37,2         | 151,0    | 0,07   | 268                   | 27       | 1,2                      |
| 8     | 25       | 3          | 13,5   | 0,6          | 26,7         | 176,0    | 0,09   | 351                   | 29       | 1,3                      |
| 9     | 50       | 0,3        | 1,4    | 6,0          | 260,0        | 97,0     | 0,03   | 92                    | 21       | 0,6                      |
| 10    | 50       | 1          | 5,3    | 1,6          | 68,4         | 130,0    | 0,05   | 223                   | 26       | 0,7                      |
| 11    | 50       | 2          | 10,0   | 0,8          | 36,2         | 156,0    | 0,07   | 268                   | 27       | 0,9                      |
| 12    | 50       | 3          | 13,7   | 0,6          | 26,2         | 178,0    | 0,08   | 353                   | 28       | 1,1                      |
| 13    | 75       | 0,3        | 1,4    | 5,9          | 258,8        | 110,0    | 0,03   | 94                    | 19       | 0,5                      |
| 14    | 75       | 1          | 5,3    | 1,6          | 67,8         | 136,0    | 0,06   | 229                   | 24       | 0,6                      |
| 15    | 75       | 2          | 10,1   | 0,8          | 35,6         | 156,0    | 0,06   | 308                   | 26       | 0,7                      |
| 16    | 75       | 3          | 14,0   | 0,6          | 25,7         | 179,0    | 0,07   | 371                   | 27       | 1,1                      |
| 17    | 100      | 0,3        | 1,5    | 5,4          | 233,8        | 109,0    | 0,03   | 105                   | 15       | 0,3                      |
| 18    | 100      | 1          | 5,6    | 1,5          | 64,5         | 142,0    | 0,05   | 253                   | 20       | 0,5                      |
| 19    | 100      | 2          | 10,5   | 0,8          | 34,2         | 181,0    | 0,06   | 346                   | 22       | 0,7                      |
| 20    | 100      | 3          | 14,9   | 0,6          | 24,1         | 186,0    | 0,07   | 396                   | 24       | 1                        |

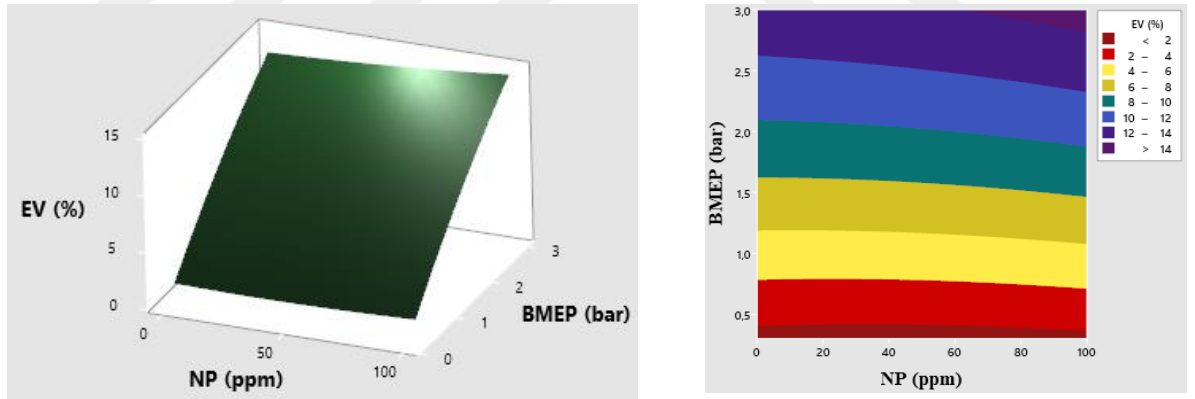
Deneysel verilerden elde edilen sonuçlar neticesinde girdi parametreleri NP (ppm) ve BMEP (bar) olurken çıktı parametreleri EV, ÖYT, ÖET, EGS, CO NO<sub>x</sub>, HC ve Duman olmaktadır. Hesaplamalarda girdi ve çıktı parametrelerinin belirlendiği programın arayüzü şekil 5.26’de gösterilmektedir.



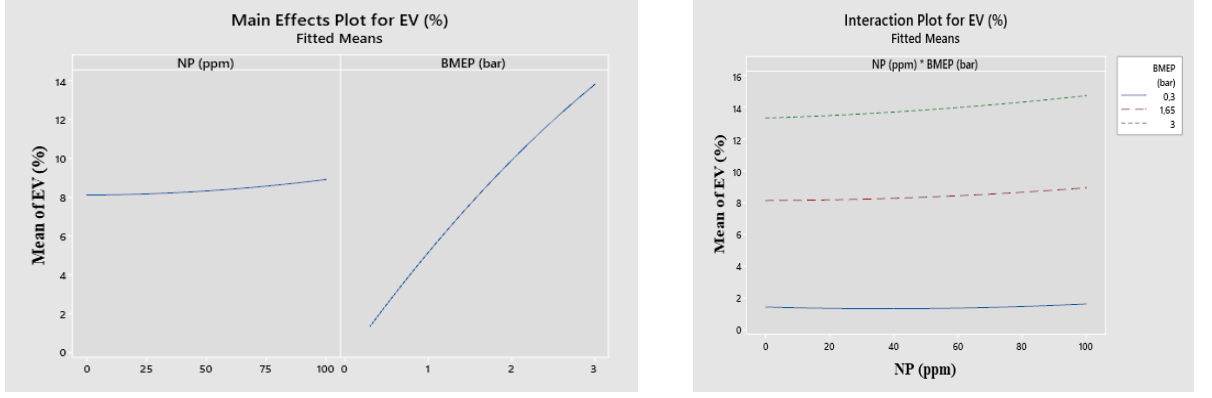
Şekil 5.26. Hesaplamalara ait girdi ve çıktı parametreleri

#### 5.4.1. Efektif Verim YYM analizi

TiO<sub>2</sub> miktarı (ppm) ve motor yükü (bar) parametrelerine bağlı olarak 5.27 ve Şekil 5.28'de efektif verim (EV) değerlerindeki değişimler sırasıyla grafiklerle gösterilmiştir.



Şekil 5.27. TiO<sub>2</sub> miktarı ve motor yüküne bağlı EV değişimi için 3d grafiği ve Karşıtlık grafiği

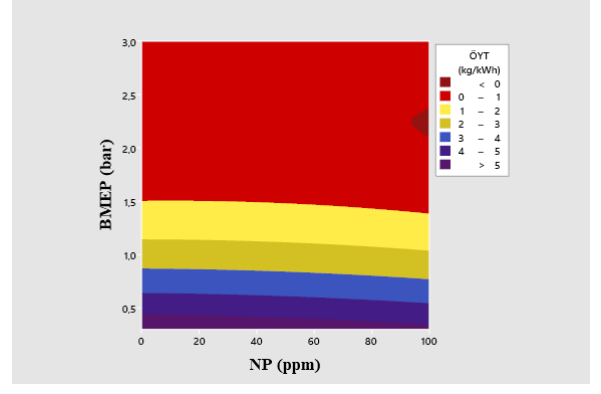
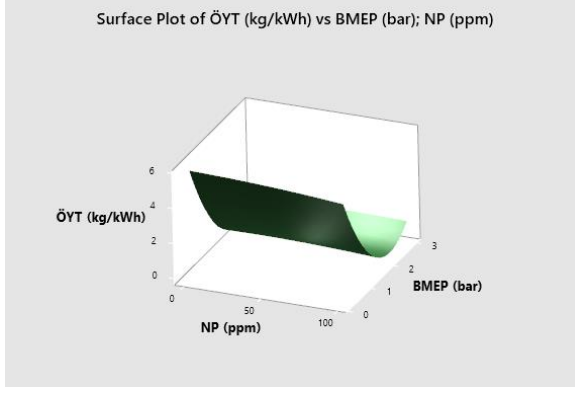


**Şekil 5.28.** TiO<sub>2</sub> miktarı ve motor yüküne bağlı EV değişimi için etki grafiği ve etkileşim grafiği

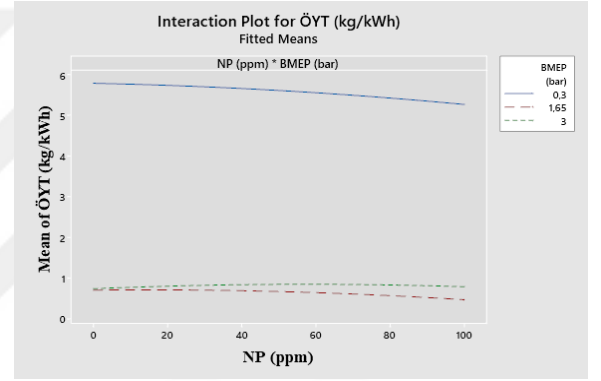
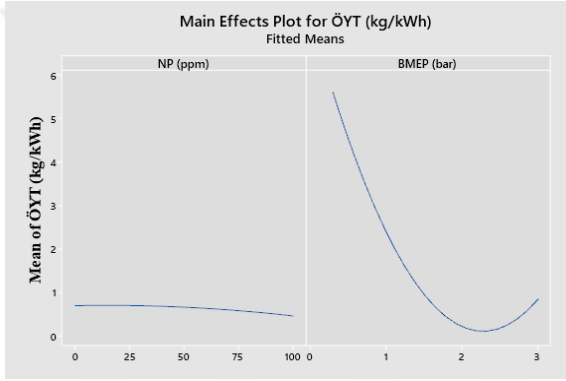
Grafikler incelendiğinde motor yükü arttırıldığında test yakıtlarının efektif verim (%) değerlerinde artma gözlenmiştir. Efektif verim değerinin motor yükünde artışla arttığını ve tam tük altında en yüksek değerlere ulaştığı belirlenmiştir. Test yakıtlarında TiO<sub>2</sub> katkı miktarının artması efektif verimi arttırmıştır. Karışımli test yakıtlarının uygun şekilde yakılması, daha iyi bozunma ve nano parçacığın yüksek yüzey alanı/hacim oranı ile yakıtın hızlı dağılımı olduğu düşünülebilir. Ayrıca Şekil 5.27 ve Şekil 5.28 analiz edildiğinde artan TiO<sub>2</sub> ve motor yükünün efektif verim üzerinde olumlu yönde etkilediği görülmüştür. En yüksek efektif verim değeri 3 bar motor yükünde ve 100 ppm TiO<sub>2</sub> katkılı yakıtında görülmüştür.

#### 5.4.2. Özgül yakıt tüketimi YYM analizi

TiO<sub>2</sub> miktarı (ppm) ve motor yükü (bar) parametrelerine bağlı olarak Şekil 5.29 ve Şekil 5.30'da özgül yakıt tüketimi (ÖYT) değerlerindeki değişimler sırasıyla grafiklerle gösterilmiştir.



**Şekil 5.29.**  $\text{TiO}_2$  miktarı ve motor yüküne bağlı olarak ÖYT değişimi için 3d grafiği ve Karşılıklı grafiği

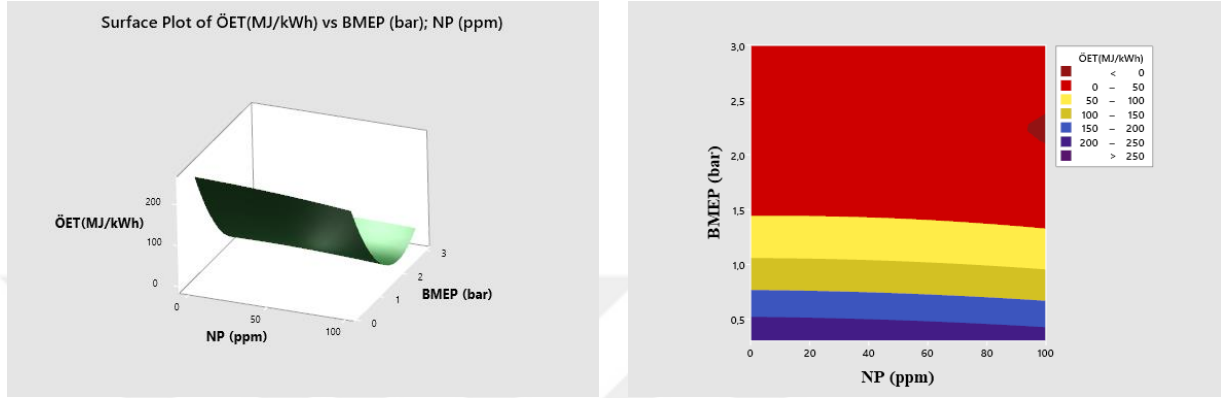


**Şekil 5.30.**  $\text{TiO}_2$  miktarı ve motor yüküne bağlı ÖYT değişimi için etki grafiği ve etkileşim grafiği

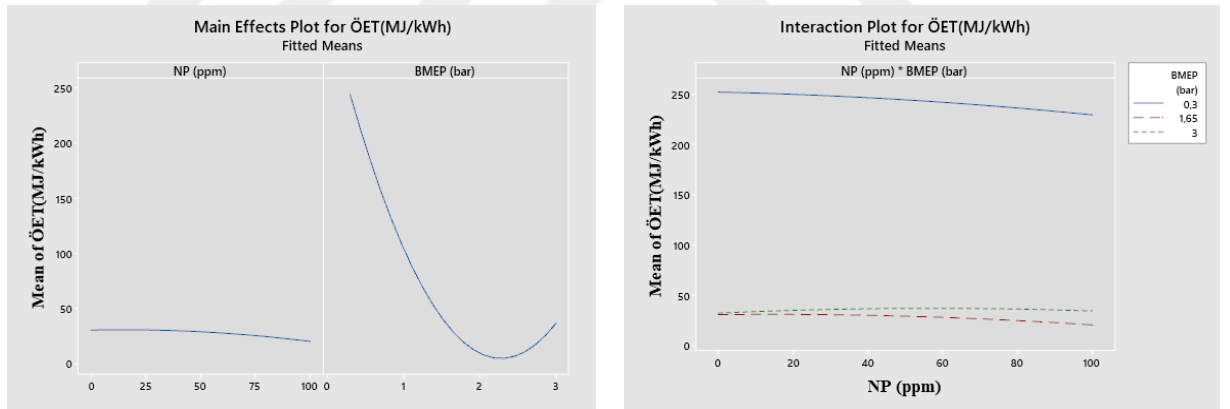
Grafikler incelendiğinde motor yükü arttırıldığında test yakıtlarının özgül yakıt tüketim (kg/kWh) değerlerinde azalma gözlenmiştir. D dizel test yakıtına göre diğer karışımli test yakıtlarının 0,3 bar düşük yükte oransal farkının yüksek olmasının nedeni katkı miktarının fazla olmasından kaynaklandığı gibi D dizel yakıtına göre karışımli yakıtların yoğunluk, vizkozite değerlerinin yüksek olması, silindir içerisinde hava/yakıt karışımlarının iyi atomizasyon gerçekleştirmediği ve silindir içerisinde sıcaklık değerlerinin düşük olması ile değerlendirilebilir. Yüksek yüklerde bu farkın azalması silindir içerisinde iyi bir atomizasyon, silindir içi sıcaklığının artması ve iyi bir yanma meydana getirdiği düşünülebilir.

### 5.4.3. Özgöl enerji tüketimi YYM analizi

TiO<sub>2</sub> miktarı (ppm) ve motor yükü (bar) parametrelerine bağlı olarak Şekil 5.31 ve Şekil 5.32’de özgül enerji tüketimi (ÖET) değerlerindeki değişimler sırasıyla grafiklerle gösterilmiştir.



Şekil 5.31. TiO<sub>2</sub> miktarı ve motor yüküne bağlı olarak ÖET değişimi için 3d grafiği ve Karşıtlık grafiği



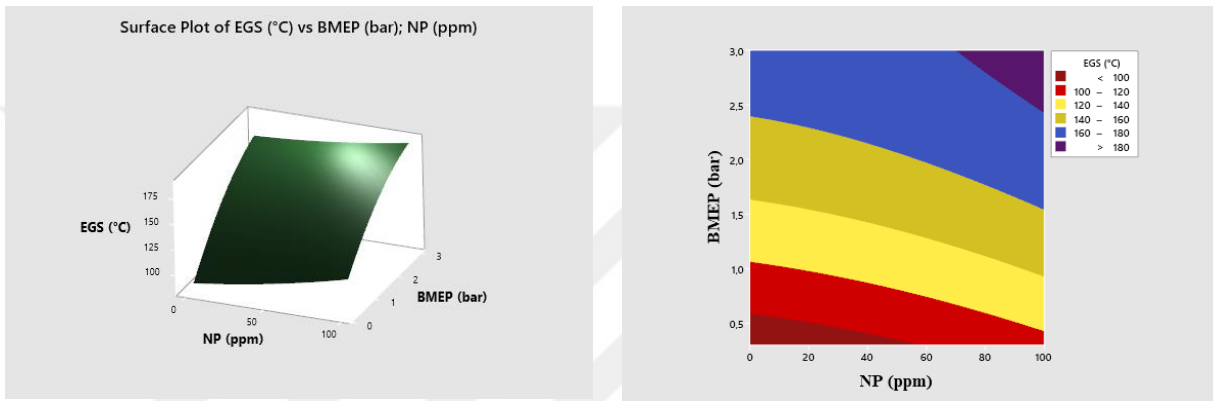
Şekil 5.32. TiO<sub>2</sub> miktarı ve motor yüküne bağlı ÖET değişimi için etki grafiği ve etkileşim grafiği

Grafikler incelendiğinde motor yükü arttırıldığında test yakıtlarının özgül enerji tüketim (MJ/kWh) değerlerinde azalma gözlenmiştir. Özgül enerji tüketim değerinin motor yükünde artışla azaldığı tam tük altında en düşük değerlere ulaştığı belirlenmiştir. Aynı motor performans değerlerini elde etmek için karışimli test yakıtlarının dizel test yakıtına göre daha az yakıt harcadığı gözlenmiştir. D dizel test yakıtının TiO<sub>2</sub> karışimli test yakıtlarına kıyasla daha az enerji içeriğine sahip olduğundan dolayı karışimli test

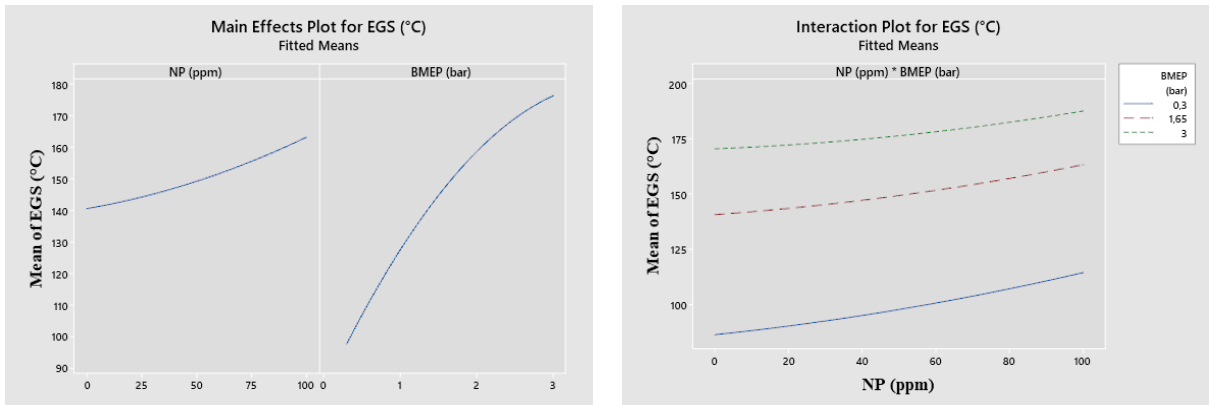
yakıtlarının içerisinde  $\text{TiO}_2$  miktarının artması daha az özgül yakıt tüketimine neden olacaktır.

#### 5.4.4. Egzoz gazı sıcaklık değeri YYM analizi

$\text{TiO}_2$  miktarı (ppm) ve motor yükü (bar) parametrelerine bağlı olarak Şekil 5.33 ve Şekil 5.34’de egzoz gazı sıcaklık (EGS) değerlerindeki değişimler sırasıyla grafiklerle gösterilmiştir.



Şekil 5.33.  $\text{TiO}_2$  miktarı ve motor yüküne bağlı olarak EGS değişimi için 3d grafiği ve Karşıtlık grafiği



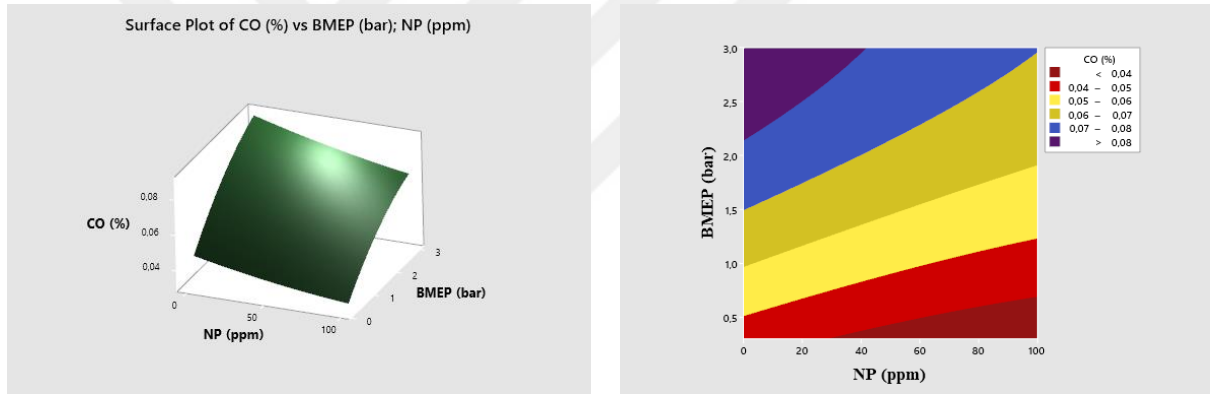
Şekil 5.34.  $\text{TiO}_2$  miktarı ve motor yüküne bağlı EGS değişimi için etki grafiği ve etkileşim grafiği

Grafikler incelendiğinde motor yükü ve karışımli yakıtların nano-madde miktarı artırıldığında test yakıtlarının egzoz gaz sıcaklık (°C) değerinde de artma gözlenmiştir. D dizel test yakıtına göre egzoz gaz sıcaklık değerinin yüksek çıkmasının nedeni silindir

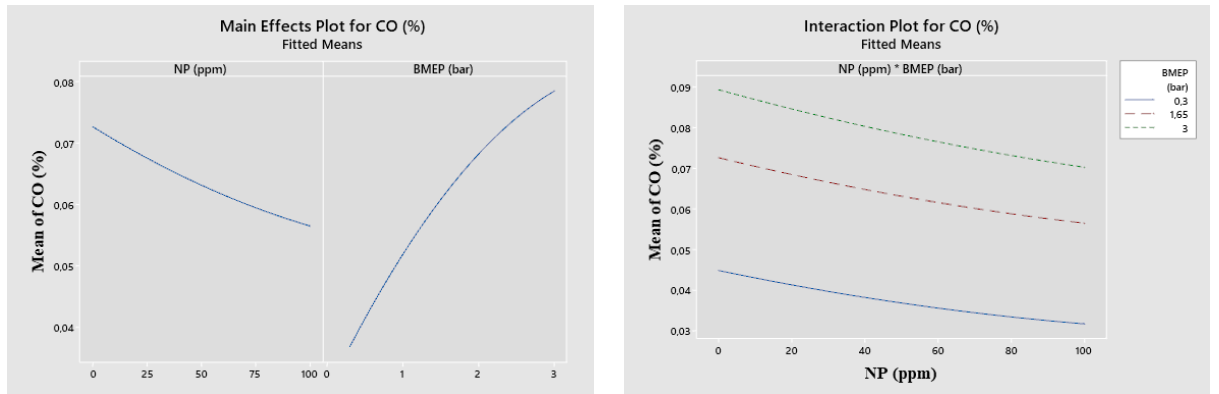
içerisindeki sıcaklık değerinin yüksek seviyede olması düşünülebilir. D dizel test yakıtının egzoz gaz sıcaklık değeri, katkılı TiO<sub>2</sub> test yakıtlarından daha az oksijen içerdiğinden yanma sonu sıcaklıkları daha düşük kalmaktadır. Katkı miktarının artırılmasıyla, en yüksek oksijen içeriğine sahip DTi100 karışımlı test yakıtı, silindir içi sıcaklığı en yüksek yakıt olduğundan en yüksek egzoz gaz sıcaklık değeri bu test yakıtında görülmüştür.

#### 5.4.5. CO değeri YYM analizi

TiO<sub>2</sub> miktarı (ppm) ve motor yükü (bar) parametrelerine bağlı olarak Şekil 5.35 ve Şekil 5.36'da ki CO emisyon değerlerindeki değişimler sırasıyla grafiklerle gösterilmiştir.



Şekil 5.35. TiO<sub>2</sub> miktarı ve motor yüküne bağlı olarak CO değişimi için 3d grafiği ve Karşıtlık grafiği

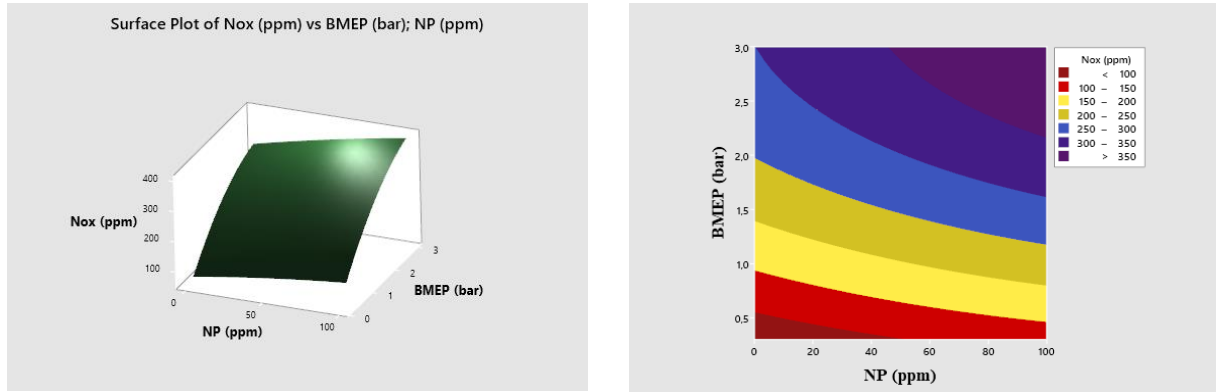


Şekil 5.36. TiO<sub>2</sub> miktarı ve motor yüküne bağlı CO değişimi için etki grafiği ve etkileşim grafiği

İnsanların uzun süre CO emisyonlarına maruz kalmaları kalp damar hastalıklarına neden olabilir hatta uzun süreli olduğunda ölüme neden olabilir. Bu yüzden motorda yanma sonucunda CO emisyonlarının mümkün olduğu kadar minimum seviyede olması istenir. Grafikler incelendiğinde motor yükü arttırıldığında test yakıtlarının CO emisyon değerlerinde artışın gözlendiği, 0,3 OEB’ de D dizel test yakıtının aynı yükteki diğer test yakıtlarına göre daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. CO oluşmasının nedeni yeterli miktarda oksijen olmaması durumunda yanmanın eksik olacağı ve buna bağlı olarak motor yükünün artmasıyla hava/yakıt oranının da azalma ve CO miktarında artışa neden olduğu düşünülebilir.  $TiO_2$  ilavesinin CO emisyonlarını azalttığı şekillerden anlaşılmaktadır.  $TiO_2$  nanopartikülleri geniş yüzey alanına sahip oldukları için oksidasyon hızını arttırmakta, buna bağlı olarak yanma verimi de artmaktadır.  $TiO_2$  katkılı yakıtların eksik yanmayı azalttığı, yanma verimini arttırdığı ve bu yüzden CO emisyonunu azalttığı düşünülebilir.

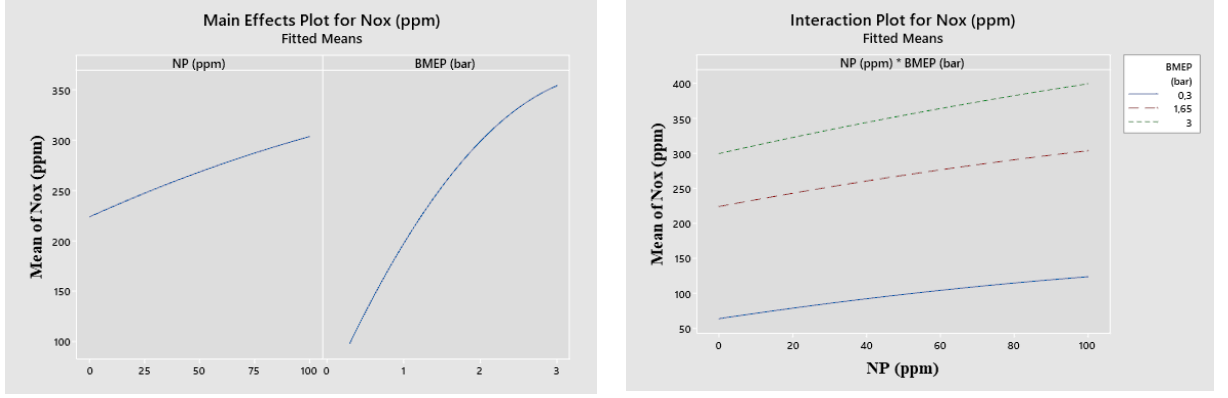
#### 5.4.6. $NO_x$ değeri YYM analizi

$TiO_2$  miktarı (ppm) ve motor yükü (bar) parametrelerine bağlı olarak Şekil 5.37 ve Şekil 5.38’de  $NO_x$  emisyon değerlerindeki değişimler sırasıyla grafiklerle gösterilmiştir.



**Şekil 5.37.**  $TiO_2$  miktarı ve motor yüküne bağlı olarak  $NO_x$  değişimi için 3d grafiği ve Karşıtlık grafiği



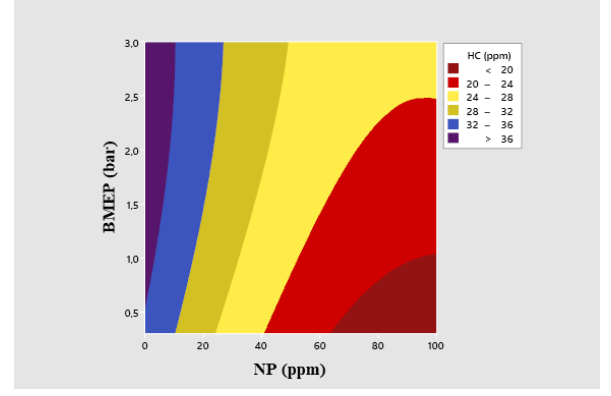
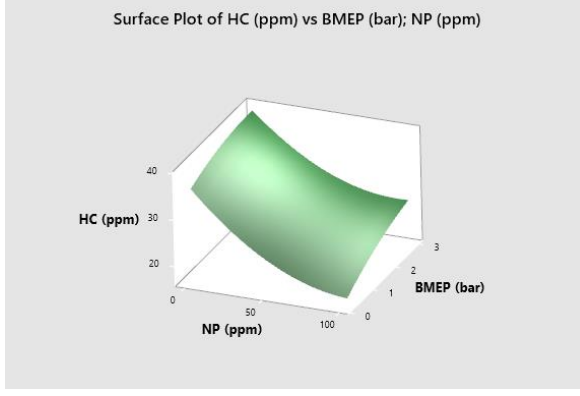


**Şekil 5.38.** TiO<sub>2</sub> miktarı ve motor yüküne bağlı NO<sub>x</sub> değişimi için etki grafiği ve etkileşim grafiği

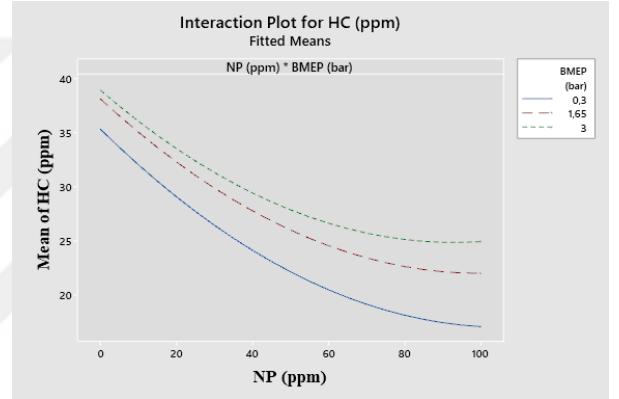
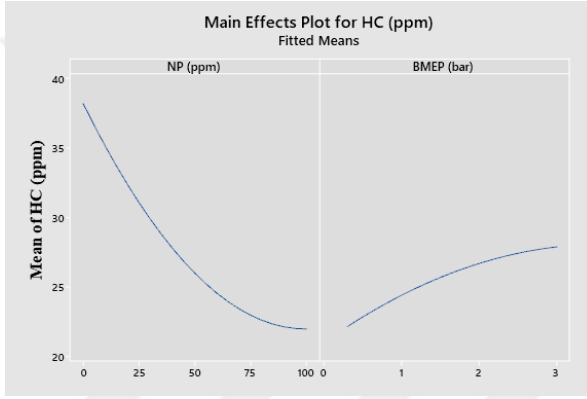
Grafikler incelendiğinde motor yükü arttırıldığında test yakıtlarının NO<sub>x</sub> emisyon değerlerinde artışı gözlenmiştir. NO<sub>x</sub> emisyonu yüksek sıcaklıklarda azotun oksijen ile reaksiyonu sonucu oluşur (Aydın vd. 2017a). TiO<sub>2</sub> katkılı yakıt karışımlarının D dizel test yakıtına göre emisyon değerlerinin yüksek çıkmasının nedeni silindir içerisindeki sıcaklık değerinin yüksek seviyede olması düşünülebilir. D dizel test yakıtının NO<sub>x</sub> değerleri katkılı TiO<sub>2</sub> test yakıtlarından daha az oksijen içerdiğinden yanma sonu sıcaklıkları daha düşük kalmaktadır. Katkı miktarının arttırılmasıyla DTi100 karışimli test yakıtında en yüksek oksijen içeriğinden dolayı silindir içi sıcaklığı en yüksek olacaktır bu durum en yüksek NO<sub>x</sub> emisyon oluşumuna neden olacaktır. Elde edilen deneysel verilerin NO<sub>x</sub> emisyonu bakımından literatürde benzer çalışmalar ile uyumlu olduğu görülmüştür.

#### 5.4.7. HC değeri YYM analizi

TiO<sub>2</sub> miktarı (ppm) ve motor yükü (bar) parametrelerine bağlı olarak Şekil 5.39 ve Şekil 5.40'da HC emisyon değerlerindeki değişimler sırasıyla grafiklerle gösterilmiştir.



**Şekil 5.39.**  $\text{TiO}_2$  miktarı ve motor yüküne bağlı olarak HC değişimi için 3d grafiği ve Karşıtlık grafiği

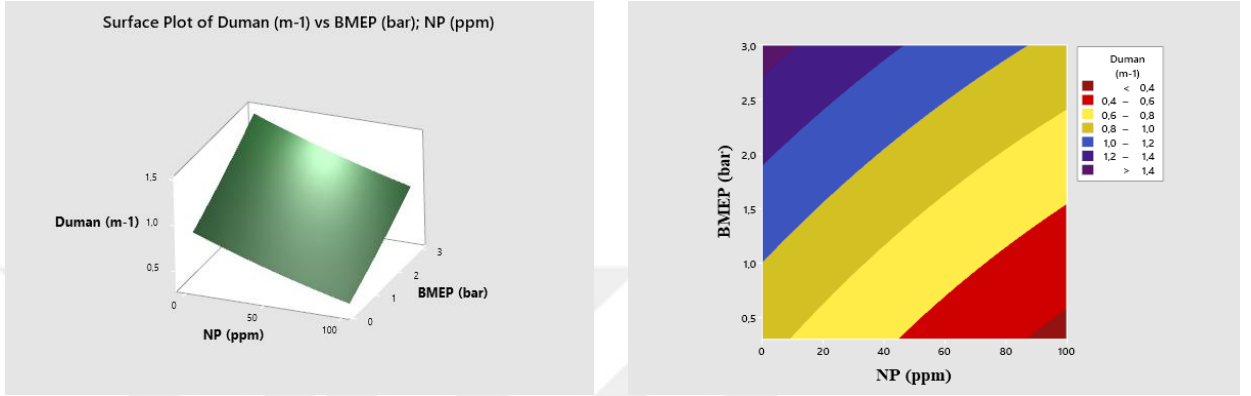


**Şekil 5.40.**  $\text{TiO}_2$  miktarı ve motor yüküne bağlı HC değişimi için etki grafiği ve etkileşim grafiği

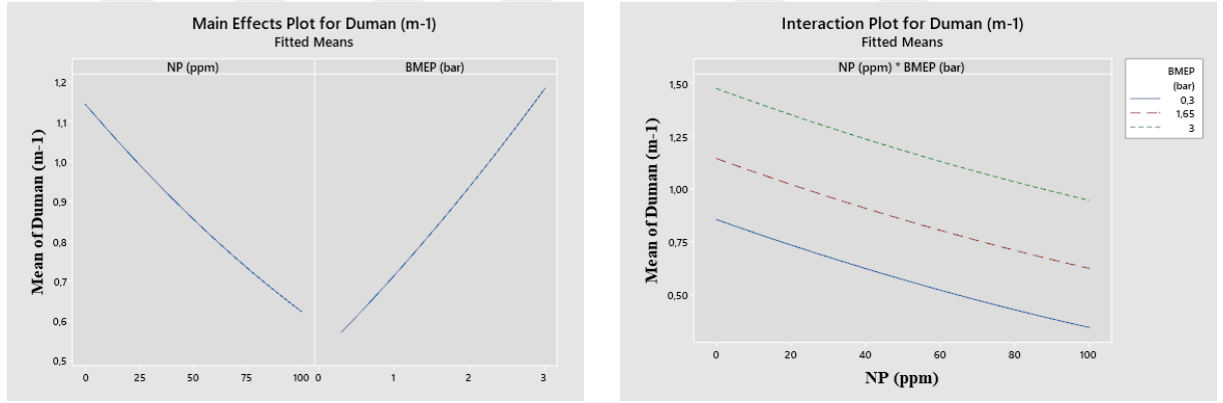
Grafikler incelendiğinde motor yükü arttırıldığında DTi25 yakıtı hariç diğer test yakıtlarının HC emisyon değerlerinde artış gözlenmiştir. Hidrokarbon (HC) emisyonlarındaki artışa katkıda bulunan başlıca faktörler, silindir içindeki düşük sıcaklık nedeniyle yerel yanmaya erişilemeyen bölgelerde sönmüleme olgusu, motor için gerekli enerjiyi üretmek için yakıt açısından zengin bir karışımın kullanılması ve diğer ilgili parametreleri içerir.  $\text{TiO}_2$  katkılı yakıt karışımlarının HC emisyonları D dizel test yakıtına göre düşük çıkması silindir içerisindeki yanmanın daha verimli olacağı değerlendirilmektedir.

#### 5.4.8. Duman koyuluğu değeri YYM analizi

TiO<sub>2</sub> miktarı (ppm) ve motor yükü (bar) parametrelerine bağlı olarak Şekil 5.41 ve Şekil 5.42’de duman emisyon değerlerindeki değişimler sırasıyla grafiklerle gösterilmiştir.



Şekil 5.41. TiO<sub>2</sub> miktarı ve motor yüküne bağlı olarak duman koyuluğu değişimi için 3d grafiği ve Karşıtlık grafiği



Şekil 5.42. TiO<sub>2</sub> miktarı ve motor yüküne bağlı duman koyuluğu değişimi için etki grafiği ve etkileşim grafiği

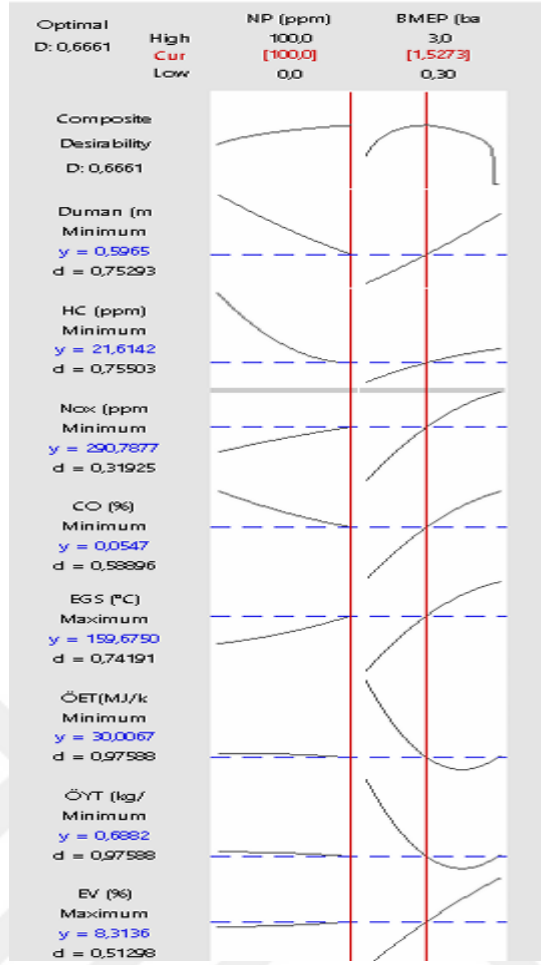
Yanıt grafikleri incelendiğinde motor yükü artırıldıkça aynı oranda motora giren yakıt artacağı için duman koyuluğu da paralel bir şekilde arttığı açıkça görülmüştür. Karışımli test yakıtları D dizel yakıtından daha fazla oksijen içeriğine sahip olduğu için hava/yakıt oranının artması fakir karışıma sebebiyet verecektir. Bu yüzden duman koyuluğu karışımli test yakıtlarında daha az olduğu gözlenmiştir.

## 5.5. Yanıtların Optimizasyonu

Yaptığımız çalışmalardaki optimizasyonun amacı, optimum titanyum dioksit oranı ile motor yükünü belirleyip bu parametrelere karşılık gelen maksimum performans ve minimum emisyon seviyelerini elde etmektir. Elde edilen yanıtlar; optimizasyon-a (tüm yanıtlar), optimizasyon-b (sadece emisyon), optimizasyon-c (sadece performans), optimizasyon-d (performans öncelikli) ve optimizasyon-e (emisyon öncelikli) olmak üzere beş farklı başlık altında incelenmiştir.

### 5.5.1. Optimizasyon-a (tüm yanıtlar)

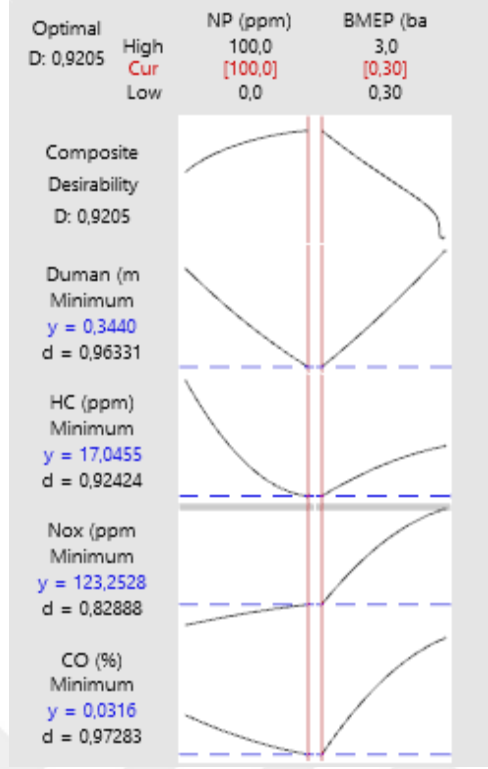
Optimizasyon-a (tüm yanıtlar) için yapılan optimizasyon sonuçlarına göre optimum  $\text{TiO}_2$  miktarı 100 NP (ppm) çıkarken, optimum motor yükü de 1,5273 BMEP (bar) olarak elde edilmiştir. Optimum  $\text{TiO}_2$  miktarı ve motor yüküne karşılık gelen yanıtlar ise Duman ( $\text{m}^{-1}$ ), HC (ppm),  $\text{No}_x$  (ppm), CO (%), EGS ( $^{\circ}\text{C}$ ), ÖET (MJ/kWh), ÖYT (kg/kWh) ve EV (%) için sırası ile 0,5965 ( $\text{m}^{-1}$ ), 21,61 (ppm), 290,8 (ppm), 0,05466 (%), 159,67 ( $^{\circ}\text{C}$ ), 30,0 (MJ/kWh), 0,688 (kg/kWh) ve 8,3136 (%) olarak bulunmuştur. Şekil 5.43’de Optimizasyon-a (tüm yanıtlar) için yapılan optimizasyon sonuçları grafik olarak gösterilmiştir. Bu grafikte seçilen motor değişkenlerinin ve katkı maddesinin en iyi değerleri kırmızı ile gösterilirken bu tepkilerden kaynaklanan optimum parametreler mavi renk ile gösterilir.



Şekil 5.43. Optimizasyon-a (tüm yanıtlar) için yapılan optimizasyon sonuçları

### 5.5.2. Optimizasyon-b (Sadece Emisyon)

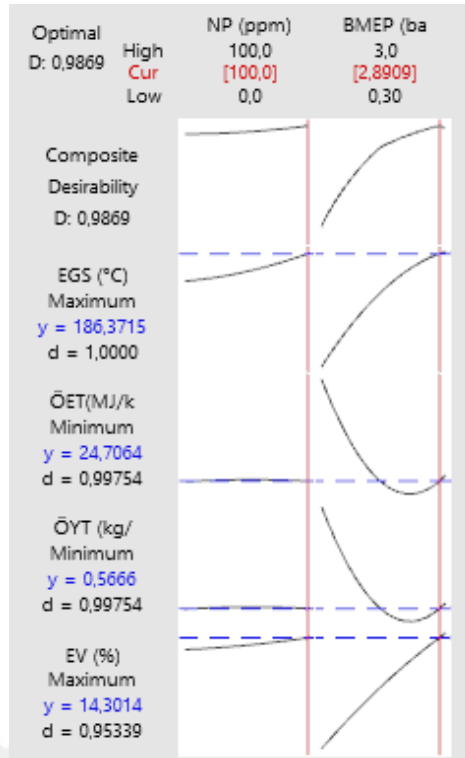
Optimizasyon-b (sadece emisyon) için yapılan optimizasyon sonuçlarına göre optimum  $\text{TiO}_2$  miktarı 100 NP (ppm) çıkarken, optimum motor yükü de 0,3 BMEP (bar) olarak elde edilmiştir. Optimum  $\text{TiO}_2$  miktarı ve motor yüküne karşılık gelen yanıtlar ise Duman ( $\text{m}^{-1}$ ), HC (ppm),  $\text{NO}_x$  (ppm) ve CO (%) için sırası ile 0,3440 ( $\text{m}^{-1}$ ), 17,05 (ppm), 123,3 (ppm) ve 0,03163 (%) olarak bulunmuştur. Şekil 5.44'de Optimizasyon-b (sadece emisyon) için yapılan optimizasyon sonuçları grafik olarak gösterilmiştir. Bu grafikte seçilen motor değişkenlerinin ve katkı maddesinin en iyi değerleri kırmızı ile gösterilirken bu tepkilerden kaynaklanan optimum parametreler mavi renk ile gösterilir.



Şekil 5.44. Optimizasyon-b (sadece emisyon) için yapılan optimizasyon sonuçları

### 5.5.3. Optimizasyon-c (Sadece Performans)

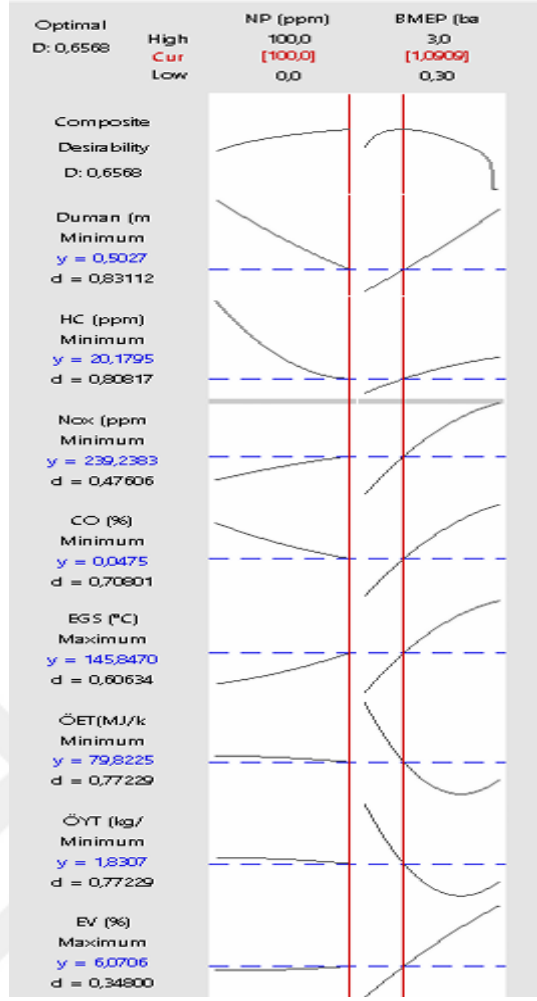
Optimizasyon-c (sadece performans) için yapılan optimizasyon sonuçlarına göre optimum  $\text{TiO}_2$  miktarı 100 NP (ppm) çıkarken, optimum motor yükü de 2,8909 BMEP (bar) olarak elde edilmiştir. Optimum  $\text{TiO}_2$  miktarı ve motor yüküne karşılık gelen yanıtlar ise EGS ( $^{\circ}\text{C}$ ), ÖET (MJ/kWh), ÖYT (kg/kWh) ve EV (%) için sırası ile 186,37 ( $^{\circ}\text{C}$ ), 24,7 (MJ/kWh), 0,567 (kg/kWh) ve 14,3014 (%) olarak bulunmuştur. Şekil 5.45’de Optimizasyon-c (sadece performans) için yapılan optimizasyon sonuçları grafik olarak gösterilmiştir. Bu grafikte seçilen motor değişkenlerinin ve katkı maddesinin en iyi değerleri kırmızı ile gösterilirken bu tepkilerden kaynaklanan optimum parametreler mavi renk ile gösterilir.



Şekil 5.45. Optimizasyon-c (sadece performans) için yapılan optimizasyon sonuçları

#### 5.5.4. Optimizasyon-d (Performans Öncelikli)

Optimizasyon-d (performans öncelikli) için yapılan optimizasyon sonuçlarına göre optimum  $\text{TiO}_2$  miktarı 100 NP (ppm) çıkarken, optimum motor yükü de 1,0909 BMEP (bar) olarak elde edilmiştir. Optimum  $\text{TiO}_2$  miktarı ve motor yüküne karşılık gelen yanıtlar ise Duman ( $\text{m}^{-1}$ ), HC (ppm),  $\text{No}_x$  (ppm), CO (%), EGS (°C), ÖET (MJ/kWh), ÖYT (kg/kWh) ve EV (%) için sırası ile 0,5027 ( $\text{m}^{-1}$ ), 20,18 (ppm), 239,2 (ppm), 0,04752 (%), 145,85 (°C), 79,8 (MJ/kWh), 1,831 (kg/kWh) ve 6,0706 (%) olarak bulunmuştur. Şekil 5.46'da Optimizasyon-d (performans öncelikli) için yapılan optimizasyon sonuçları grafik olarak gösterilmiştir. Bu grafikte seçilen motor değişkenlerinin ve katkı maddesinin en iyi değerleri kırmızı ile gösterilirken bu tepkilerden kaynaklanan optimum parametreler mavi renk ile gösterilir.

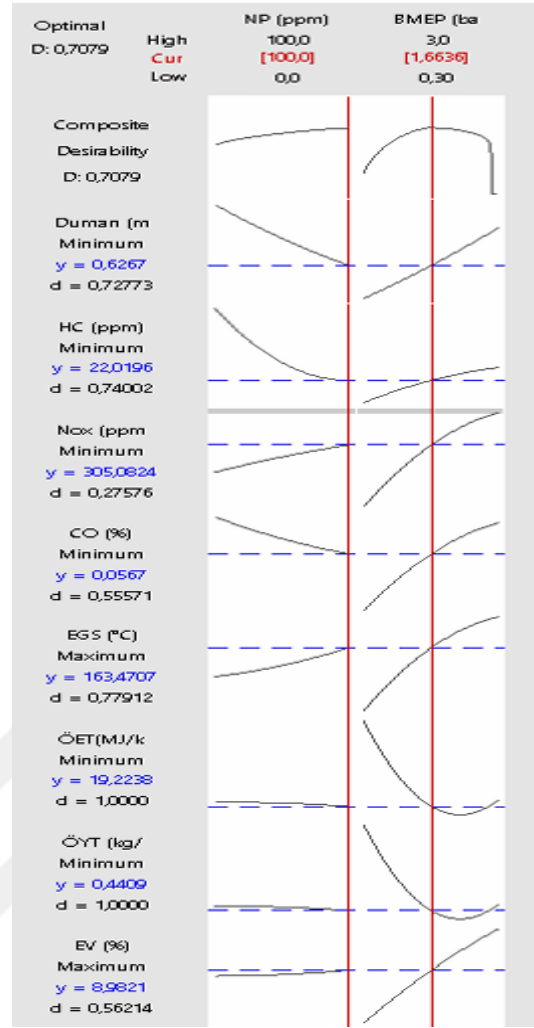


Şekil 5.46. Optimizasyon-d (performans öncelikli) için yapılan optimizasyon sonuçları

### 5.5.5. Optimizasyon-e (Emisyon Öncelikli)

Optimizasyon-e (emisyon öncelikli) için yapılan optimizasyon sonuçlarına göre optimum  $\text{TiO}_2$  miktarı 100 NP (ppm) çıkarken, optimum motor yükü de 1,6636 BMEP (bar) olarak elde edilmiştir. Optimum  $\text{TiO}_2$  miktarı ve motor yüküne karşılık gelen yanıtlar ise Duman ( $\text{m}^{-1}$ ), HC (ppm),  $\text{NO}_x$  (ppm), CO (%), EGS ( $^{\circ}\text{C}$ ), ÖET (MJ/kWh), ÖYT (kg/kWh) ve EV (%) için sırası ile 0,6267 ( $\text{m}^{-1}$ ), 22,02 (ppm), 305,1 (ppm), 0,05666 (%), 163,47 ( $^{\circ}\text{C}$ ), 19,2 (MJ/kWh), 0,441 (kg/kWh) ve 8,9821 (%) olarak bulunmuştur. Şekil 5.47’de Optimizasyon-e (emisyon öncelikli) için yapılan optimizasyon sonuçları grafik olarak gösterilmiştir. Bu grafikte seçilen motor değişkenlerinin ve katkı maddesinin en iyi değerleri kırmızı ile gösterilirken bu tepkilerden kaynaklanan optimum parametreler mavi renk ile gösterilir.





Şekil 5.47. Optimizasyon-d (emisyon öncelikli) için yapılan optimizasyon sonuçları

Motor performans verilerinin en yüksek seviyeye çıkarılması ve emisyon değerlerinin en aza indirilmesi için, optimum giriş parametreleri olarak motor yükü ve TiO<sub>2</sub> nanopartikül katkı maddesinin miktarının belirlenmesi bu çalışmanın amacı olarak özetlenebilir. 3 boyutlu grafiklerde her bir yanıt için gösterilen ayrı ayrı optimum TiO<sub>2</sub> miktarı ve motor yükü gösterilmiştir. Tüm modellerde optimum nanopartikül oranının 100 ppm ve motor yükünün 0,3 OEB ile 2,89 OEB arasında değişkenlik gösterdiği belirlenmiştir. Bu değerlere karşılık gelen yanıtlar ise çizelge 5.15’de gösterilmiştir.

**Çizelge 5.14.** Yanıtların optimizasyonu

| Model | Optimal | NP<br>(ppm) | BMEP<br>(bar) | EV<br>(%) | ÖYT<br>(kg/kWh) | ÖET<br>(MJ/kWh) | EGS<br>(°C) | CO<br>(%) | No <sub>x</sub><br>(ppm) | HC<br>(ppm) | Duman<br>(m <sup>-1</sup> ) |
|-------|---------|-------------|---------------|-----------|-----------------|-----------------|-------------|-----------|--------------------------|-------------|-----------------------------|
| a     | 0,67    |             | 1,52          | 8,31      | 0,68            | 30,00           | 159,67      | 0,05      | 290,78                   | 21,61       | 0,59                        |
| b     | 0,92    |             | 0,3           | -         | -               | -               | -           | 0,03      | 123,25                   | 17,04       | 0,34                        |
| c     | 0,99    |             | 2,89          | 14,30     | 0,56            | 24,70           | 186,37      | -         | -                        | -           | -                           |
| d     | 0,66    | 100         | 1,09          | 6,07      | 1,83            | 79,82           | 145,84      | 0,04      | 239,23                   | 20,17       | 0,50                        |
| e     | 0,71    |             | 1,66          | 8,98      | 0,44            | 19,22           | 163,47      | 0,05      | 305,08                   | 22,01       | 0,62                        |

Beş farklı başlık altında (optimizasyon a-e) incelenen yanıtların optimizasyon sonuçlarına göre motor yükü değiştiği, TiO<sub>2</sub> nanopartikül (ppm) miktarının 100 (ppm) olarak sabit kaldığı gözlenmiştir. TiO<sub>2</sub> nanopartikül (ppm) ilavesinin optimizasyonu katkı miktarının en yüksek 100 (ppm) TiO<sub>2</sub> olduğu performans ve emisyon değerlerini iyileştirdiği görülmüştür. Motor yükü optimizasyonunun değişkenliği sadece emisyon, sadece performans, performans önceliği ve emisyon önceliği gibi isterlerin değişkenliğinden kaynaklanmaktadır.

## 5.6. İstatiksel Analiz

### 5.6.1. Varyans analizi (ANOVA)

Motor yükü ve nanopartikül oransal etkisini tanımlamak için varyans analizi ANOVA (analysis of variance) kullanılmıştır. ANOVA, birden fazla değişkenin anlamlı olup olmasını, çeşitli faktör seviyelerinde yanıt faktörü araçlarını karşılaştırarak değerlendirir (Khan vd. 2023). Anova tablosunda F ve p değeri dikkat edilmesi gereken en önemli hususlardandır. F değerinin büyük olması daha etkili faktör anlamına gelmektedir. Genel sonucun anlamlı olması F istatistiği sayesinde olurken p değeri ile birlikte kullanılması gerekmektedir. P değerinin 0,05'den küçük olması bir faktörün cevap üzerinde anlamlı olmasını ifade eder (Yaman vd. 2021). P değerinin 0,05'den büyük olması giriş parametresinin deney için önemsiz kabul edilmesi anlamına gelir. Daha yüksek bir F değerine karşılık gelen giriş parametrelerinin değişimi, çıktı üzerinde önemli bir etki olduğunu gösterir (Simsek vd. 2021).

**Çizelge 5. 15.** R<sup>2</sup> için ANOVA sonuçları

| Faktörler                | R <sup>2</sup> | R <sup>2</sup><br>Düzeltilmiş | R <sup>2</sup><br>Tahmin |
|--------------------------|----------------|-------------------------------|--------------------------|
| EV (%)                   | %99,96         | %99,95                        | %99,88                   |
| ÖYT (kg/kWh)             | %93,36         | %90,98                        | %88,01                   |
| ÖET(MJ/kWh)              | %93,36         | %90,98                        | %88,01                   |
| EGS (°C)                 | %98,30         | %97,69                        | %96,42                   |
| CO (%)                   | %93,17         | %90,73                        | %87,17                   |
| No <sub>x</sub> (ppm)    | %97,29         | %96,32                        | %94,54                   |
| HC (ppm)                 | %90,90         | %87,65                        | %80,19                   |
| Duman (m <sup>-1</sup> ) | %96,98         | %95,90                        | %93,80                   |

**Çizelge 5.16.** Model terimler için p değerleri

| Faktörler                | TiO <sub>2</sub> | Yük   | TiO <sub>2</sub> <sup>2</sup> | Yük <sup>2</sup> | TiO <sub>2</sub> * Yük |
|--------------------------|------------------|-------|-------------------------------|------------------|------------------------|
| EV (%)                   | 0,000            | 0,000 | 0,006                         | 0,000            | 0,000                  |
| ÖYT (kg/kWh)             | 0,586            | 0,000 | 0,818                         | 0,000            | 0,617                  |
| ÖET(MJ/kWh)              | 0,586            | 0,000 | 0,818                         | 0,000            | 0,617                  |
| EGS (°C)                 | 0,000            | 0,000 | 0,331                         | 0,000            | 0,202                  |
| CO (%)                   | 0,000            | 0,000 | 0,632                         | 0,072            | 0,524                  |
| No <sub>x</sub> (ppm)    | 0,000            | 0,000 | 0,671                         | 0,001            | 0,263                  |
| HC (ppm)                 | 0,000            | 0,001 | 0,007                         | 0,442            | 0,313                  |
| Duman (m <sup>-1</sup> ) | 0,000            | 0,000 | 0,406                         | 0,520            | 0,865                  |

Anlamlı – (0,000 &lt; p ≤ 0,05).

Yaptığımız çalışmada, seçilen motor değişkenlerinin dizel motor için emisyon ve performans tepkileri üzerindeki etkilerini tanımlamak için ANOVA uygulanmıştır. Varyans analizi (ANOVA) tabloları oluşturularak elde edilen R<sup>2</sup>, her terim için p değerleri ve regresyon denklemleri sırası ile Çizelge 5.16, Çizelge 5.17 ve Çizelge 5.18’de verilmiştir. Çizelge 5.16’de elde edilen yanıtlar için R<sup>2</sup> değerleri EV (%), EGS (°C), No<sub>x</sub> (ppm) ve Duman (m<sup>-1</sup>) 0,95’den büyük olduğundan istatistiksel olarak %95 güven düzeyinde anlamlı olduğu söylenebilir. Diğer yanıtlar için R<sup>2</sup> değerleri ÖYT (kg/kWh), ÖET(MJ/kWh), CO (%), ve HC (ppm) sırasıyla %93,36, %93,36, %93,17 ve %90,90 olarak bulunmuştur. Bu sonuçlara göre %90 üzerinde istatistiksel olarak güven düzeyinde anlamlı olduğu anlaşılmaktadır. Çizelge 5.17’de sunulan değerler, seçilen giriş parametrelerinin ilgili p değerlerine dayalı olarak motor çıkış tepkileri üzerindeki etkilerinin istatistiksel önemini gösterir. %95 güven düzeyinde yürütülen araştırma, 0,05’in altında p değerine sahip değişkenlerin istatistiksel olarak anlamlı kabul edildiğini

ve yanıt üzerinde bir etkisi olduğunu göstermektedir. Çizelge 5.16'ye göre TiO<sub>2</sub> ÖYT ve ÖET dışındaki tüm tepkileri etkilerken, motor yükü tüm tepkiler üzerinde etkilidir. Modelden elde edilen regresyon denklemleri Çizelge 5.18'de verilmiştir.

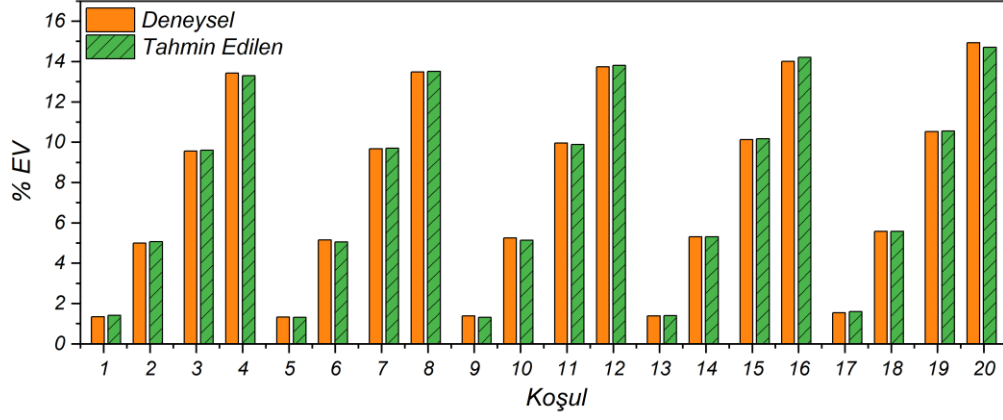
### 5.6.2 YYM Model Doğrulaması

Modellerden elde edilen regresyon denklemleri çizelge 5.18' de verilmiştir. Bu denklemler her bir yanıt için oluşturulmuş 2. Dereceden polinom matematiksel bağıntılardır.

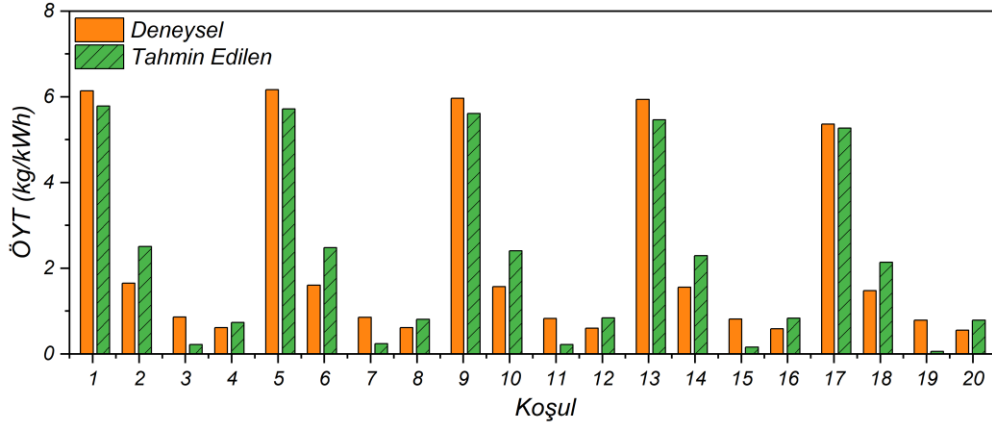
**Çizelge 5.17.** Regresyon denklemleri

| Parametre             | Denklem                                                                                                                                       |
|-----------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| EV (%)                | $= -0.284 - 0.00710 \text{ NP} + 5.777 \text{ BMEP} + 0.000076 \text{ NP}^2 - 0.4162 \text{ BMEP}^2 + 0.004535 \text{ NP} * \text{BMEP}$      |
| ÖYT (kg/kWh)          | $= 7.612 - 0.0025 \text{ NP} - 6.508 \text{ BMEP} - 0.000033 \text{ NP}^2 + 1.405 \text{ BMEP}^2 + 0.00211 \text{ NP} * \text{BMEP}$          |
| ÖET (MJ/kWh)          | $= 331.9 - 0.109 \text{ NP} - 283.8 \text{ BMEP} - 0.00145 \text{ NP}^2 + 61.26 \text{ BMEP}^2 + 0.092 \text{ NP} * \text{BMEP}$              |
| EGS (°C)              | $= 70.76 + 0.187 \text{ NP} + 53.37 \text{ BMEP} + 0.00106 \text{ NP}^2 - 6.73 \text{ BMEP}^2 - 0.0407 \text{ NP} * \text{BMEP}$              |
| CO (%)                | $= 0.03713 - 0.000182 \text{ NP} + 0.02651 \text{ BMEP} + 0.000001 \text{ NP}^2 - 0.00303 \text{ BMEP}^2 - 0.000022 \text{ NP} * \text{BMEP}$ |
| No <sub>x</sub> (ppm) | $= 16.0 + 0.746 \text{ NP} + 164.2 \text{ BMEP} - 0.00189 \text{ NP}^2 - 23.23 \text{ BMEP}^2 + 0.147 \text{ NP} * \text{BMEP}$               |
| HC (ppm)              | $= 34.46 - 0.3507 \text{ NP} + 3.15 \text{ BMEP} + 0.001629 \text{ NP}^2 - 0.550 \text{ BMEP}^2 + 0.0158 \text{ NP} * \text{BMEP}$            |
| Duman (m-1)           | $= 0.7971 - 0.00624 \text{ NP} + 0.1909 \text{ BMEP} + 0.000011 \text{ NP}^2 + 0.0118 \text{ BMEP}^2 - 0.000067 \text{ NP} * \text{BMEP}$     |

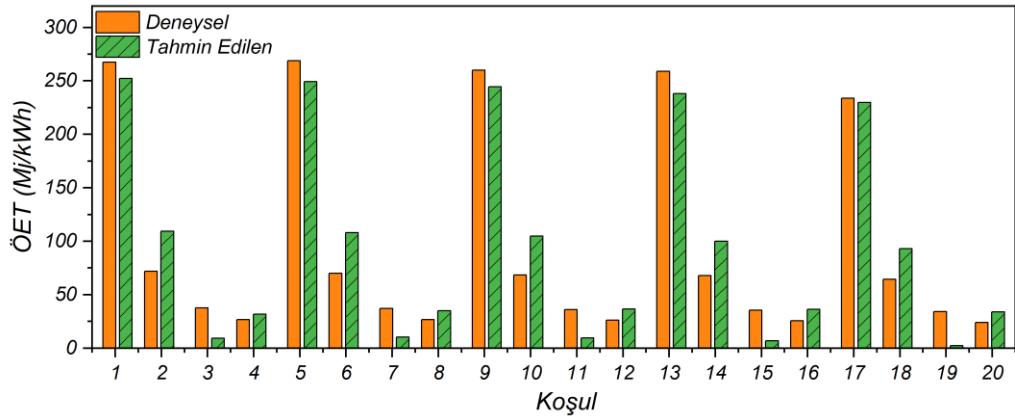
Elde edilen optimum sonuçların doğruluğunu belirlemek için deneysel veriler ile tahmin edilen optimum sonuçlar arasında doğrulama metodu çalışması yapılmıştır. Duman (m<sup>-1</sup>), HC (ppm), No<sub>x</sub> (ppm), CO (%), EGS (°C), ÖET (MJ/kWh), ÖYT (kg/kWh) ve EV (%) değerlerine ait optimum sonuçlar ile deneysel sonuçlar arasında ki kıyaslama Şekil 5.48, Şekil 5.49, Şekil 5.50, Şekil 5.51, Şekil 5.52, Şekil 5.53, Şekil 5.54 ve Şekil 5.55'de verilmiştir.



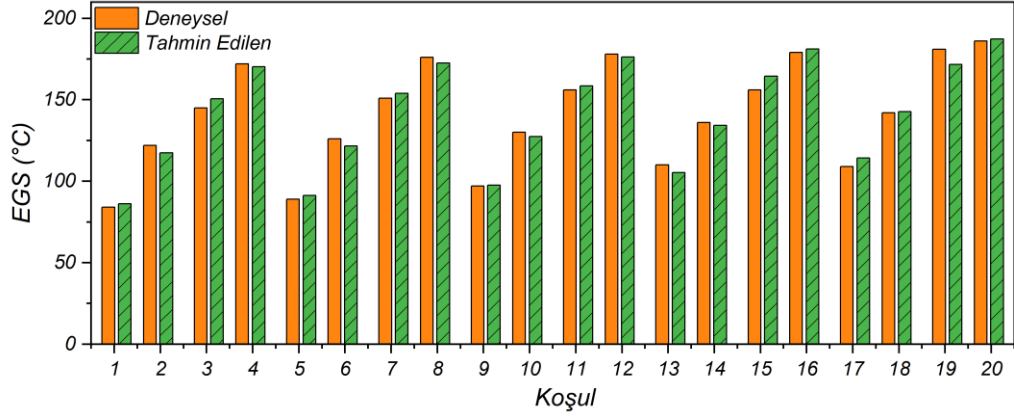
Şekil 5.48. EV (%) değerlerine ait optimum sonuçlar ile deneysel sonuçlar grafiği



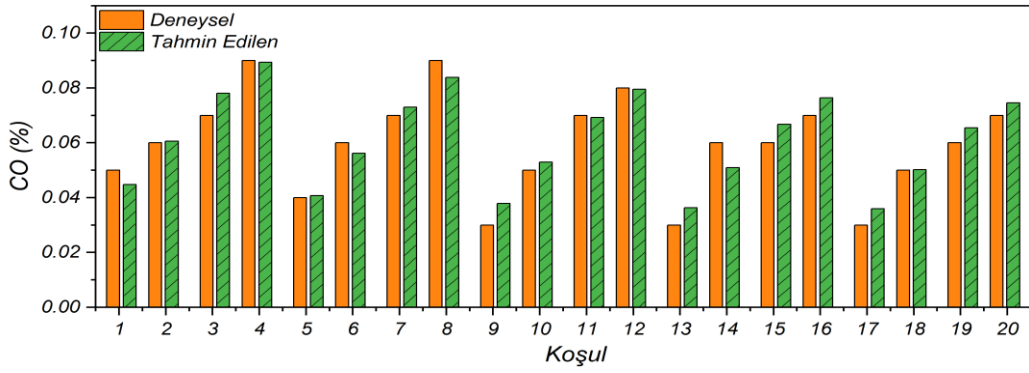
Şekil 5.49. ÖYT (kg/kWh) değerlerine ait optimum sonuçlar ile deneysel sonuçlar grafiği



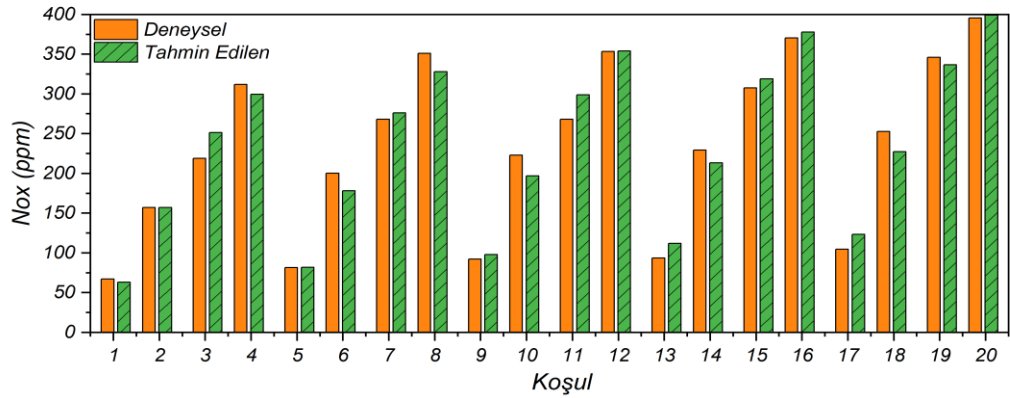
Şekil 5.50. ÖET (MJ/kWh) değerlerine ait optimum sonuçlar ile deneysel sonuçlar grafiği



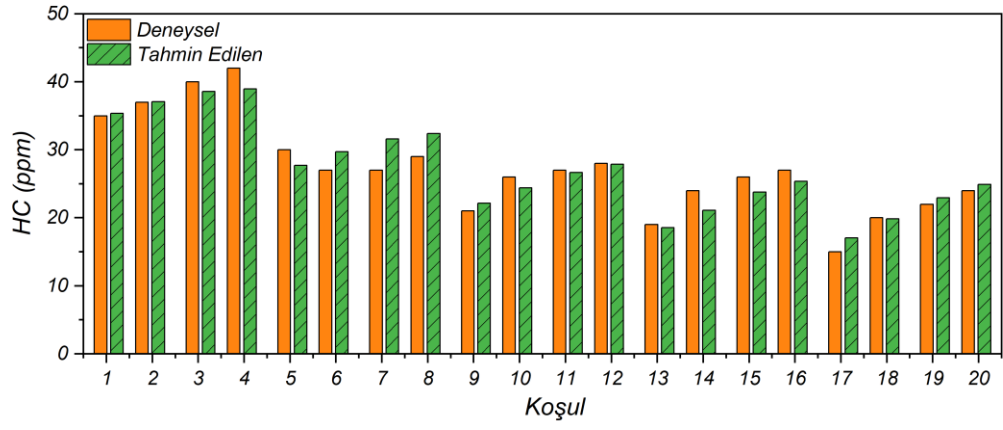
Şekil 5.51. EGS (°C) değerlerine ait optimum sonuçlar ile deneysel sonuçlar grafiği



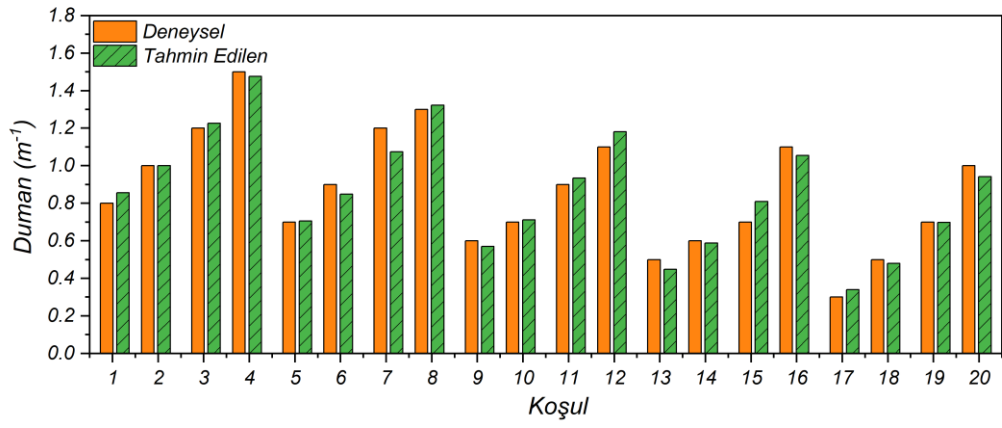
Şekil 5.52. CO (%) değerlerine ait optimum sonuçlar ile deneysel sonuçlar grafiği



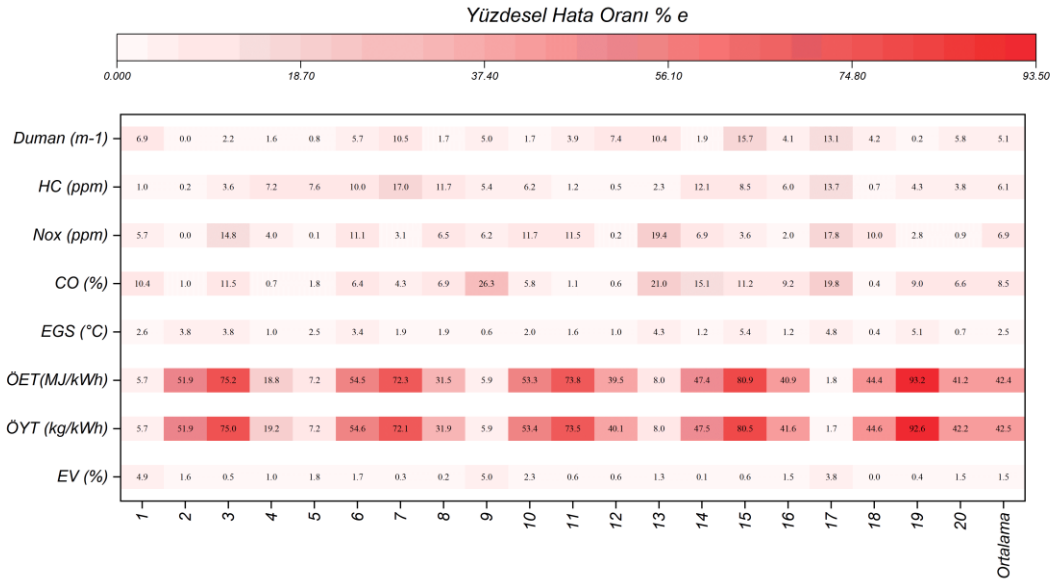
Şekil 5.53. No<sub>x</sub> (ppm) değerlerine ait optimum sonuçlar ile deneysel sonuçlar grafiği



Şekil 5.54. HC (ppm) değerlerine ait optimum sonuçlar ile deneysel sonuçlar grafiği



Şekil 5.55. Duman (m<sup>-1</sup>) değerlerine ait optimum sonuçlar ile deneysel sonuçlar grafiği



**Şekil 5.56.** Optimum sonuçlar ile deneysel sonuçlar arasındaki hata oranı (%)

Deney sonuçları ile optimum sonuçları arasındaki hata oranı (%) hesaplanmış olup yüzdesel hata oranı şekil 5.56’da gösterilmiştir. İstatiksel olarak tüm değerler analiz edildiğinde aşağıdaki sonuçları elde etmekteyiz;

- EV (%), EGS (°C), CO (%), HC (ppm) ve Duman (m-1) değişkenleri, düşük MAPE, SSRE, RSE ve RMSE değerlerine sahip. Bu değişkenlerdeki tahminler gözlemlerle uyumlu ve güvenilir.
- ÖYT (kg/kWh) ve ÖET (MJ/kWh) değişkenleri, çok yüksek MAPE, SSRE, RSE ve RMSE değerlerine sahip. Bu durum, bu iki değişkenin tahminlerinin gözlemlerle büyük ölçüde uyumsuz olduğunu gösteriyor. Bu değişkenler için tahmin modelinin yeniden değerlendirilmesi veya iyileştirilmesi gerekebilir.
- Çoğu değişken için MBE, tahminlerin gözlemlerle dengeli olduğunu gösteriyor; büyük yanlılıklar yok. Ancak Nox (ppm) ve CO (%) gibi bazı değişkenlerde küçük yanlılıklar mevcut.
- CO (%) (t-istatistiği 1,117) ve Duman (m-1) (t-istatistiği 0,107) dışındaki tüm değişkenlerin t-istatistiği 0.1’in altında veya çok düşük, bu da bu değişkenlerin tahminlerin anlamlılık düzeyinin düşük olduğunu ifade eder.
- Genel olarak, EV (%) ve Duman (m-1) değişkenleri tahmin doğruluğu açısından en başarılı sonuçları verirken, ÖYT (kg/kWh) ve ÖET (MJ/kWh) tahmin doğruluğunun en zayıf olduğu değişkenler olarak göze çarpıyor.



Modellerden elde edilen istatistiksel analiz değerleri izelge 5.19’ da verilmiştir.

**Çizelge 5.18.** İstatistiksel analiz değerleri

| Parametreler             | MPE %  | MAPE   | SSRE  | RSE   | MBE    | RMSE   | t-stat |
|--------------------------|--------|--------|-------|-------|--------|--------|--------|
| EV (%)                   | -0,077 | 1,474  | 0,009 | 0,027 | 0,001  | 0,093  | 0,025  |
| ÖYT (kg/kWh)             | -0,242 | 42,467 | 5,074 | 0,650 | -0,002 | 0,558  | 0,009  |
| ÖET(MJ/kWh)              | 0,035  | 42,368 | 5,073 | 0,650 | 0,037  | 24,314 | 0,005  |
| EGS (°C)                 | -0,090 | 2,470  | 0,017 | 0,038 | 0,019  | 4,105  | 0,015  |
| CO (%)                   | -4,331 | 8,453  | 0,247 | 0,144 | -0,002 | 0,005  | 1,117  |
| No <sub>x</sub> (ppm)    | -1,048 | 6,921  | 0,162 | 0,116 | 0,054  | 17,063 | 0,011  |
| HC (ppm)                 | -0,564 | 6,146  | 0,120 | 0,100 | -0,002 | 2,033  | 0,003  |
| Duman (m <sup>-1</sup> ) | -0,200 | 5,145  | 0,090 | 0,087 | 0,002  | 0,052  | 0,107  |

Yapılan doğrulama çalışmasında bulunan istatistiksel sonuçlar belli parametrelerde değişkenlik göstermesine rağmen genel olarak çalışmanın başarılı olduğunu görülmektedir. Literatür incelendiğinde bulunan hata oranlarının benzer veya yüksek çıktığı çalışmalar mevcuttur (Kumar vd. 2020).

## 6. SONUÇLAR

Yapılan bu optimizasyon çalışmasında dizel yakıtına, farklı miktarlarda (25, 50, 75 ve 100 ppm)  $\text{TiO}_2$  nano partikül maddesi ekleyerek test yakıtları hazırlanmıştır. Test yakıtları, farklı motor yükleri altında (0,3, 1, 2 ve 3 OEB) performans, emisyon ve yanma analizi deneysel olarak araştırılmış D dizel test yakıtı ile kıyaslanarak etkileri incelenmiştir. Daha sonra yüzey yanıt metodu (YYM) ile optimum  $\text{TiO}_2$  miktarını ve motor yükünü belirlemek için optimizasyonu yapılmıştır. Ayrıca optimum çalışma şartlarına karşılık gelen motor çıkış tepkileri belirlenmiştir. Deneysel çalışmalardan elde edilen bulgular aşağıda verilmiştir.

- $\text{TiO}_2$  karışımlı test yakıtları iki zamanlı bir dizel motorda kullanılabilirliği gözlenmiştir.
- $\text{TiO}_2$  karışımlı test yakıtlarının aynı motor yükünü elde etmek için D dizel yakıtına göre özgül yakıt tüketimi (ÖYT) ve özgül enerji tüketimi (ÖET) gibi motor performans çıktılarının daha az enerji ve daha az yakıt tüketimi ile gerçekleştirdiği anlaşılmaktadır.
- Efektif verim değerinin motor yükünde artışla arttığını ve tam tük altında en yüksek değerlere ulaştığı belirlenmiştir. Test yakıtlarında  $\text{TiO}_2$  katkı miktarının artması efektif verimi arttırdığı gözlenmiştir.
- $\text{TiO}_2$  katkılı yakıt karışımlarının HC emisyonları D dizel test yakıtına göre düşük çıktığı,  $\text{TiO}_2$  katkılı yakıt karışımlarında bulunan oksijenin miktarı D dizel test yakıtına oranla daha fazla olduğu için CO emisyonu ve duman koyuluğu değerlerinin bu sebeple daha düşük olduğu ortaya çıkmıştır.
- $\text{TiO}_2$  katkılı yakıt karışımlarının D dizel test yakıtına göre yüksek oksijen içeriğinden dolayı silindir içi sıcaklığı en yüksek olduğu ve bu sebeple en yüksek  $\text{NO}_x$  emisyon değerinin  $\text{TiO}_2$  katkılı yakıt karışımlarında olduğu gözlenmiştir.
- $\text{TiO}_2$  katkı miktarının arttırılmasıyla, oksijen içeriğinin yükselmesi, silindir içi sıcaklığı yükselteceğinden dolayı egzoz gaz sıcaklık değerinin bu test yakıtlarında arttığı görülmüştür.
- Yanma analizi yüksek yüklerde maksimum net ısı salınımının dizel yakıtı oranla karışımli yakıtlarda daha fazla olduğu, yakıtı eklenen  $\text{TiO}_2$  nano-

madde miktarına bağılı olarak silindir basıncında sürekli artış olduğu, kümülatif ısı salınım değeri ve basınç artış oranının karışımı yakıtlar da arttığı gözlenmiştir.

- Nano-partikül madde miktarı aralığı (25ppm-100ppm) deneysel çalışmaların grafikleri incelendiğinde yaklaşık olarak 100 ppm ideal değerlere ulaştığı ve sonra sabit bir seyir izlediği bu sebeple deneysel çalışmalarda nano partiküllerin miktar aralığını 100 ppm'in altında tutmak genellikle daha güvenli ve etkili olacağı değerlendirilmektedir.
- Yaptığımız çalışmada, seçilen motor değişkenlerinin dizel motor için emisyon ve performans tepkileri üzerindeki etkilerini tanımlamak için ANOVA uygulanmıştır. Çizelge 5.16'de elde edilen yanıtlar için  $R^2$  değerleri EV (%), EGS (°C),  $NO_x$  (ppm) ve Duman ( $m^{-1}$ ) 0,95'den büyük olduğundan istatistiksel olarak %95 güven düzeyinde anlamlı olduğu söylenebilir.
- %95 güven düzeyinde yürütülen araştırma, 0,05'in altında p değerine sahip değişkenlerin istatistiksel olarak anlamlı kabul edildiğini ve yanıt üzerinde bir etkisi olduğunu göstermektedir. Çizelge 5.17'ye göre  $TiO_2$  ÖYT ve ÖET dışındaki tüm tepkileri etkilerken, motor yükü tüm tepkiler üzerinde etkilidir.
- Optimizasyondan elde edilen sonuçlara göre tüm modellerde optimum nanopartikül oranının 100 ppm ve motor yükünün 0,3 OEB ile 2,89 OEB arasında değişkenlik gösterdiği belirlenmiştir. Deneysel ve tahmin edilen değerler arasında yapılan doğrulama çalışmasında bulunan hata oranı minimum seviyede çıkması optimizasyon çalışmalarının başarılı olduğunu göstermektedir.
- Sonuç olarak  $TiO_2$  nanopartiküllerinin dizel motorun performansını artırmak ve emisyonlarını azaltmak için dizel yakıt karışımına iyi bir katkı maddesi olduğunu ve hava kirliliğini azaltmak için alternatif bir yakıt olarak kullanılabileceğini gösterdi. Yüzey yanıt metodu (YYM) ile optimum  $TiO_2$  miktarı ve motor yükü optimizasyonu belirlenmiştir.

## KAYNAKLAR

- Ağbulut, Ümit. 2022. "Understanding the role of nanoparticle size on energy, exergy, thermoeconomic, exergoeconomic, and sustainability analyses of an IC engine: A thermodynamic approach". *Fuel Processing Technology* 225:107060.
- Anonim. t.y.-a. "bp-stats-review-2022-full-report.pdf".
- Anonim. t.y.-b. "https://nanografi.com/nanoparticles/titanium-dioxide-tio2-nanopowder-nanoparticles-rutile-99-5-size-200-nm/".
- Anonim. t.y.-c. "https://www.tupras.com.tr/assets/img/article/newsletters/urun-guvenlik-bilgi-formu-motorin.pdf".
- Aydın, Mustafa, Mehmet Afşar, ve M. Bahattin Çelik. 2017a. "Tek silindirli bir dizel motorda atık biyodizel kullanımının motor performansı ve emisyonlarına etkisi." *Sakarya University Journal of Science* 21(5).
- Aydın, Mustafa, Mehmet Afşar, ve M. Bahattin Çelik. 2017b. "The effects of waste biodiesel usage on engine performance and emissions at a single cylinder diesel engine". *Sakarya University Journal of Science* 21(5):871-78.
- Bakan, Faruk. t.y. "Biyodizel yakıt karışımlarının ve püskürtme basıncının motor performansına ve yanmaya olan etkileri." Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Bidir, Michael G., N. K. Millerjothi, Muiyiwa S. Adaramola, ve Ftwi Y. Hagos. 2021. "The role of nanoparticles on biofuel production and as an additive in ternary blend fuelled diesel engine: A review". *Energy Reports* 7:3614-27.
- Bilginpek, H. 1991. "Dizel motorları". *MEB Basımevi* (s 30).
- Borat, O., A. Surmen, ve M. Balci. 1992. *İçten Yanmalı Motorlar (Internal Combustion Engine)*. Teknik Eğitim Vakfı Yayınları, Ankara.
- Chapra, Steven C., ve Raymond P. Canale. 2010. *Numerical methods for engineers*. Boston: McGraw-Hill Higher Education,.
- Devarajan, Yuvarajan, Beemkumar Nagappan, ve Ganesan Subbiah. 2019. "A comprehensive study on emission and performance characteristics of a diesel engine fueled with nanoparticle-blended biodiesel". *Environmental Science and Pollution Research* 26:10662-72.
- Ejder, Süleyman Bulut. 2007. "Etanol-dizel, biyodizel-dizel yakıt karışımlarının kullanımının motor performansına etkilerinin deneysel araştırılması". Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Eliçin, Ahmet Konuralp. 2011. "Biyodizel yakıtla çalıştırılan küçük güçlü bir dizel motorun performans ve emisyonuna giriş hava basıncı etkisinin deneysel olarak araştırılması".

- Erdem, KOÇ, ve Kaya Kadir. 2015. “ENERJİ KAYNAKLARI–YENİLENEBİLİR ENERJİ DURUMU”. *Mühendis ve Makina* 56(668):36-47.
- Ergen, Gökhan. 2006. “Ön ısıtma uygulanarak kullanılan biyodizel yakıtının motor performans ve emisyonlarına etkisinin incelenmesi”. Sakarya Üniversitesi (Turkey).
- Fangsuwannarak, Karoon, ve Kittichai Triratanasirichai. 2013. “Effect of metalloid compound and bio-solution additives on biodiesel engine performance and exhaust emissions”. *American journal of applied sciences* 10(10):1201.
- Fetting, Constanze. 2020. “The European Green Deal”. *ESDN Report, December*.
- Gad, M. S., Ümit Ağbulut, Asif Afzal, Hitesh Panchal, S. Jayaraj, Naef AA Qasem, ve A. S. El-Shafay. 2023. “A comprehensive review on the usage of the nano-sized particles along with diesel/biofuel blends and their impacts on engine behaviors”. *Fuel* 339:127364.
- Geng, Limin, Shijie Li, Yonggang Xiao, Hao Chen, Xubo Chen, ve Yanlei Ma. 2021. “Influence of the addition of titanium oxide nanoparticles to Fischer-Tropsch diesel synthesised from coal on the combustion characteristics and particulate emission of a diesel engine”. *Process Safety and Environmental Protection* 145:411-24.
- Ghanbari, Mani, Lotfali Mozafari-Vanani, Masoud Dehghani-Soufi, ve Ahmad Jahanbakhshi. 2021. “Effect of alumina nanoparticles as additive with diesel–biodiesel blends on performance and emission characteristic of a six-cylinder diesel engine using response surface methodology (RSM)”. *Energy Conversion and Management: X* 11:100091.
- Haşımoğlu, Can. 2005. “Düşük ısı kayıplı bir dizel motorunda biyodizel kullanımının performans ve emisyon parametrelerine etkisi”. Sakarya Üniversitesi (Turkey).
- Hoang, Anh Tuan. 2021. “Combustion behavior, performance and emission characteristics of diesel engine fuelled with biodiesel containing cerium oxide nanoparticles: A review”. *Fuel Processing Technology* 218:106840.
- Holman, Jack Philip. 2021. “Experimental Methods for Engineers EIGHTH EDITION”.
- Jain, Akshay, Bhaskor Jyoti Bora, Rakesh Kumar, Prabhakar Sharma, Bhaskar Jyoti Medhi, Aitazaz Ahsan Farooque, Vineet Tirth, N. Senthilkumar, ve Pramod Kumar Peyyala. 2023. “Impact of titanium dioxide (TiO<sub>2</sub>) nanoparticles addition in Eichhornia Crassipes biodiesel used to fuel compression ignition engine at variable injection pressure”. *Case Studies in Thermal Engineering* 49:103295.
- Jeryraj Kumar, L., G. Anbarasu, ve T. Elangovan. 2016. “Effects on nano additives on performance and emission characteristics of calophyllum inophyllum biodiesel”. *International Journal of ChemTech Research* 9(4):210-19.
- KELEN, Fevzi. 2014. “Motorlu taşıt emisyonlarının insan sağlığı ve çevre üzerine etkileri”. *Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi* 19(1-2):80-87.

- Khan, Osama, Mohd Zaheen Khan, Bhupendra Kumar Bhatt, Md Toufique Alam, ve Manoj Tripathi. 2023. "Multi-objective optimization of diesel engine performance, vibration and emission parameters employing blends of biodiesel, hydrogen and cerium oxide nanoparticles with the aid of response surface methodology approach". *International Journal of Hydrogen Energy* 48(56):21513-29.
- Kumar, A. Naresh, P. S. Kishore, K. Brahma Raju, B. Ashok, R. Vignesh, A. K. Jeevanantham, K. Nanthagopal, ve A. Tamilvanan. 2020. "Decanol proportional effect prediction model as additive in palm biodiesel using ANN and RSM technique for diesel engine". *Energy* 213:119072.
- Kumar, B. Rajesh, ve S. Saravanan. 2016. "Use of higher alcohol biofuels in diesel engines: A review". *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 60:84-115.
- Martins, Florinda, Carlos Felgueiras, Miroslava Smitkova, ve Nidia Caetano. 2019. "Analysis of fossil fuel energy consumption and environmental impacts in European countries". *Energies* 12(6):964.
- Mirbagheri, Seyed Amin, Seyed Mohammad Safieddin Ardebili, ve Mostafa Kiani Deh Kiani. 2020. "Modeling of the engine performance and exhaust emissions characteristics of a single-cylinder diesel using nano-biochar added into ethanol-biodiesel-diesel blends". *Fuel* 278:118238.
- Ojha, Pawan Kumar, ve Srinibas Karmakar. 2018. "Boron for liquid fuel Engines-A review on synthesis, dispersion stability in liquid fuel, and combustion aspects". *Progress in Aerospace Sciences* 100:18-45.
- Opuz, Mehmet. 2022. "Biyodizel içerisinde metalik esaslı yakıt katkı maddesi ilavesinin motor performansı ve egzoz emisyonları üzerindeki etkisinin incelenmesi". Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Örs, I., S. Sarıkoç, A. E. Atabani, SEBAHATTİN Ünalın, ve S. O. Akansu. 2018. "The effects on performance, combustion and emission characteristics of DIC engine fuelled with TiO<sub>2</sub> nanoparticles addition in diesel/biodiesel/n-butanol blends". *Fuel* 234:177-88.
- Pali, Harveer Singh, Abhishek Sharma, Manish Kumar, Vivek Anand Annakodi, Nishant Kumar Singh, Yashvir Singh, Dhinesh Balasubramanian, Balakrishnan Deepanraj, Thanh Hai Truong, ve Phuoc Quy Phong Nguyen. 2023. "Enhancement of combustion characteristics of waste cooking oil biodiesel using TiO<sub>2</sub> nanofluid blends through RSM". *Fuel* 331:125681.
- Prabhu, L., S. Satish Kumar, A. Anderson, ve K. Rajan. 2015. "Investigation on performance and emission analysis of TiO<sub>2</sub> nanoparticle as an additive for biodiesel blends". *Journal of Chemical and pharmaceutical Sciences, Special* (7):408-12.
- Praveen, Anchupogu, G. Lakshmi Narayana Rao, ve B. Balakrishna. 2018. "Performance and emission characteristics of a diesel engine using Calophyllum inophyllum biodiesel blends with TiO<sub>2</sub> nanoadditives and EGR". *Egyptian journal of petroleum* 27(4):731-38.

- Razzaq, Luqman, Muhammad Mujtaba Abbas, Ahsan Waseem, Tahir Abbas Jauhar, H. Fayaz, M. A. Kalam, Manzoor Elahi M. Soudagar, A. S. Silitonga, ve Usama Ishtiaq. 2023. "Influence of varying concentrations of TiO<sub>2</sub> nanoparticles and engine speed on the performance and emissions of diesel engine operated on waste cooking oil biodiesel blends using response surface methodology". *Heliyon* 9(7).
- Sadhik Basha, J., ve R. B. Anand. 2011. "Role of nanoadditive blended biodiesel emulsion fuel on the working characteristics of a diesel engine". *Journal of Renewable and Sustainable energy* 3(2).
- Safgönül, Behçet, Metin Ergeneman, H. Ertuğrul Arslan, ve Cem Soruşbay. 2013a. *İçten yanmalı motorlar*. Birsen Yayınevi.
- Safgönül, Behçet, Metin Ergeneman, H. Ertuğrul Arslan, ve Cem Soruşbay. 2013b. *İçten yanmalı motorlar*. Birsen Yayınevi.
- Safgönül, Behçet, Metin Ergeneman, H. Ertuğrul Arslan, ve Cem Soruşbay. 2013c. *İçten yanmalı motorlar*. Birsen Yayınevi.
- Sarikoç, Selçuk. 2019. "Biyodizel-bütanol-dizel karışımlarına hidrojen ve titanyum dioksit ilavesinin performans ve emisyon parametrelerine etkilerinin araştırılması".
- Saxena, Vishal, Niraj Kumar, ve Vinod Kumar Saxena. 2019. "Multi-objective optimization of modified nanofluid fuel blends at different TiO<sub>2</sub> nanoparticle concentration in diesel engine: Experimental assessment and modeling". *Applied energy* 248:330-53.
- Simsek, Suleyman, Samet Uslu, Hatice Simsek, ve Gonca Uslu. 2021. "Multi-objective-optimization of process parameters of diesel engine fueled with biodiesel/2-ethylhexyl nitrate by using Taguchi method". *Energy* 231:120866.
- Singh, Kunwar P., Shikha Gupta, Arun K. Singh, ve Sarita Sinha. 2011. "Optimizing adsorption of crystal violet dye from water by magnetic nanocomposite using response surface modeling approach". *Journal of Hazardous Materials* 186(2-3):1462-73.
- Sungur, Bilal, Bahattin Topaloglu, ve Hakan Ozcan. 2016. "Effects of nanoparticle additives to diesel on the combustion performance and emissions of a flame tube boiler". *Energy* 113:44-51.
- Sütcü, Deniz. 2021. "Potasyum permanganat (KMnO<sub>4</sub>) katkılı atık bitkisel yağlardan elde edilen biyoyakıt ile dizel yakıt karışımlarının bir araştırma motorunda kullanılması". Batman Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü.
- ŞAHİN, HAMİT. 2022. "DİZEL MOTORDA ETANOL-BİYODİZEL KULLANIMININ MOTOR PARAMETRELERİNE ETKİSİ".
- Tan, Tarhan. 2022. "Mangan esaslı dizel-biyodizel yakıt karışımlarının bir dizel motorda kullanımının araştırılması". Batman Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü.

- Tillem, İsmail. 2005. "Dizel motorlar için alternatif yakıt olarak biyodizel üretimi ve kullanımı". Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Uslu, Samet, Suleyman Simsek, ve Hatice Simsek. 2023. "RSM modeling of different amounts of nano-TiO<sub>2</sub> supplementation to a diesel engine running with hemp seed oil biodiesel/diesel fuel blends". *Energy* 266:126439.
- Uyumaz, Ahmet. 2009. "Pamuk yağı esaslı biyodizel ile çalışan bir dizel motorunda yakıt püskürtme avansının motor performansına ve egzoz emisyonlarına etkileri". Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Venu, Harish, Lingesan Subramani, ve V. Dhana Raju. 2019. "Emission reduction in a DI diesel engine using exhaust gas recirculation (EGR) of palm biodiesel blended with TiO<sub>2</sub> nano additives". *Renewable energy* 140:245-63.
- Verma, Suraj, Rakesh Upadhyay, Ravi Shankar, ve Satya Prakash Pandey. 2023. "Performance and emission characteristics of micro-algae biodiesel with butanol and TiO<sub>2</sub> nano-additive over diesel engine". *Sustainable Energy Technologies and Assessments* 55:102975.
- Veza, Ibham, Martin Spraggon, IM Rizwanul Fattah, ve Muhammad Idris. 2023. "Response surface methodology (RSM) for optimizing engine performance and emissions fueled with biofuel: Review of RSM for sustainability energy transition". *Results in Engineering* 101213.
- Yaman, Hayri, Murat Kadir Yeşilyurt, ve Samet Uslu. 2021. "Buji ateşlemeli bir motorda yüksek performans ve düşük emisyon elde etmek amacıyla kullanılacak optimum metanol oranının cevap yüzey metodu ile belirlenmesi". *Gazi Mühendislik Bilimleri Dergisi* 7(3):346-58.
- Yamık, H. 2002. "Dizel Motorlarında Alternatif Yakıt Olarak Yağ Esterlerinin Kullanılma İmkânlarının Araştırılması". Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Yeşilyurt, Murat Kadir. 2020. "Dizel yakıtına farklı ağır alkoller (1-Bütanol, 1-Pentanol ve 1-Hekzanol) ilave edilmesinin tek silindirli bir dizel motorunun performans, yanma ve egzoz emisyon karakteristiklerine etkileri". *Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi* 12(2):397-426.
- Yusuf, Abdulfatah Abdu, Freddie L. Inambao, ve Jeffrey Dankwa Ampah. 2022. "The effect of biodiesel and CeO<sub>2</sub> nanoparticle blends on CRDI diesel engine: A special focus on combustion, particle number, PM<sub>2.5</sub> species, organic compound and gaseous emissions". *Journal of King Saud University-Engineering Sciences*.



## ÖZGEÇMİŞ

### KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : AYTAÇ ATMACA  
Uyruğu : T.C

### EĞİTİM

| Derece        | Adı, İlçe, İl                  | Bitirme Yılı |
|---------------|--------------------------------|--------------|
| Üniversite    | : ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ/ERZURUM | 2020         |
| Yüksek Lisans | :                              |              |
| Doktora       | :                              |              |

### İŞ DENEYİMLERİ

| Yıl | Kurum | Görevi |
|-----|-------|--------|
|-----|-------|--------|

### UZMANLIK ALANI

### YABANCI DİLLER

### YAYINLAR