MARMARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

BİYODİZEL n-OKTANOL YAKIT KARIŞIMINA NANOPARTİKÜL İLAVESİNİN MOTOR PERFORMANSI VE YANMA ÜZERİNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ

GÜVEN DEMİRTAŞ

DOKTORA TEZİ
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı
Makine Mühendisliği (Türkçe)

DANIŞMAN
Prof. Dr. Cenk SAYIN

EŞ-DANIŞMAN
Dr. Öğr. Üyesi Mustafa Kemal BALKİ

İSTANBUL, 2023

MARMARA UNIVERSITY
INSTITUTE FOR GRADUATE STUDIES IN PURE AND APPLIED SCIENCES

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF ADDING NANOPARTICLES TO BIODIESEL n-OCTANOL FUEL MIXTURE ON ENGINE PERFORMANCE AND COMBUSTION

GÜVEN DEMİRTAŞ

Ph.D. THESIS

Department of Mechanical Engineering

Thesis Supervisor

Prof. Dr. Cenk SAYIN

Thesis CO-Supervisor

Dr. Öğr. Üyesi Mustafa Kemal BALKİ

ISTANBUL, 2023

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

"Biyodizel n-Oktanol Yakıt Karışımına Nanopartikül İlavesinin Motor Performansı ve Yanma Üzerine Etkisinin İncelenmesi" isimli bu doktora tez çalışması, Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği (Türkçe) Anabilim Dalı'nda hazırlanmıştır.

Doktora programına başladığım bu süreçte, her daim yardımlarını ve desteğini esirgemeyen, değerli zamanını ayıran, bilimsel bilgi ve tecrübelerini benimle paylaşan, zorlukların üzerimde oluşturduğu yorgunluğunu hissettiğim dönemlerde motivasyonumu sağlayan danışmanın Sayın Prof. Dr. Cenk SAYIN'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Tez sürecimin her aşamasında değerli zamanını ayıran, desteğini esirgemeyen, bilgisi, tecrübesi, yorumları ve tavsiyeleriyle rehberlik eden, Sayın Dr. Öğr. Üy. Mustafa Kemal BALKİ'ye içten teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmamın kalitesinin arttırılmasında geliştirici fikir ve önerilerinden yararlandığım, tez izleme komitesi üyeleri, Sayın Prof. Dr. Ahmet Necati ÖZSEZEN ve Sayın Prof. Dr. Mustafa ATMACA'ya şükranlarımı sunarım.

Yaşamım boyunca her konuda maddi ve manevi desteğini sunan, bu günlere gelmemde emeklerini ve fedakârlıklarını esirgemeyen, lisansüstü eğitimimde teşvik ve yönlendirmeleriyle gerektiğinde bilgi ve tecrübeleriyle katkı sağlayan değerli aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Son olarak, bu süreçte sabrı, hoşgörüsü, sevgisi ve anlayışını, hiçbir zaman eksik etmeyen, çalışma azmimi arttıran değerli eşim Hatice KIYATSİL DEMİRTAŞ'a içten teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR i
İÇİNDEKİLER ii
ÖZET vii
ABSTRACT viii
YENİLİK BEYANI x
SEMBOLLER xi
KISALTMALAR xv
ŞEKİL LİSTESİ xvi
TABLO LİSTESİ xviii
1.GİRİŞ 1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI 3
3. DİZEL MOTORLARDA YANMA 15
3.1. Tutuşma Gecikmesi 16
3.2. Kontrolsüz (Ani) Yanma 16
3.3. Kontrollü Yanma 17
3.4. Art Yanma 17
4. DİZEL MOTORLARDA KİRLETİCİ EMİSYONLAR 19
4.1. CO Emisyonları 19
4.2. HC Emisyonları 20
4.3. NO_x Emisyonları 20
4.4. CO_2 Emisyonları 22
4.5. İs Emisyonları 23
5. DİZEL MOTORLARDA KULLANILAN ALTERNATİF YAKITLAR, YAKIT KATKI MADDELERİ VE YAKIT ÖZELLİKLERİ 24

5.1. Biyodizel Yakıtlar 24
5.2. Alkol Yakıtlar 25
5.3. Yakıt Katkı Maddeleri 27
5.4. Yakıtların Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri 31
5.4.1. Yoğunluk 31
5.4.2. Viskozite 32
5.4.3. Setan sayısı 33
5.4.4. Isıl değer 33
5.4.5. Uçuculuk 34
5.4.6. Parlama noktası 34
5.4.7. Tutuşma noktası 34
6. HESAPLAMALAR 35
6.1. Motor Performans Hesabı 35
6.1.1. Motor momenti 35
6.1.2. Efektif motor gücü 35
6.1.3. Fren özgül yakıt tüketimi 36
6.1.4. Fren özgül enerji tüketimi 37
6.1.5. Fren termik verim 37
6.1.6. Giriş havasının yoğunluğu 38
6.1.7. Volumetrik verim 38
6.1.8. Hava-Yakıt Oranı 39
6.1.9. Yanma verimi 39
6.2. Yanma Analizi 40
6.2.1. Anlık silindir hacmi 40
6.2.2. Silindir içi gaz basıncı 42
6.2.3. Isı dağılımı 43

6.3. Özgül Egzoz Emisyonları 45
6.4. Belirsizlik Analizi 45
7. MATERYAL VE YÖNTEM 47
7.1. n-Oktanol 47
7.2. Sodyum Dodesil Sülfat (SDS) 47
7.3. Nanopartiküller 48
7.4. Hassas Terazi 49
7.5. Ultrasonik Karıştırıcı 50
7.6. Deney Donanımı 50
7.6.1. Deney Motoru 52
7.6.2. Egzoz gaz analizörü 54
7.7. Deneysel Çalışmada kullanılan test yakıtları 55
7.8. Motor Deneyleri 58
8. BULGULAR VE TARTIŞMA 59
8.1. MWCNT İlaveli Test Yakıtlarının Performans, Emisyon ve Yanma Karakteristikleri 59
8.1.1. Motor performansı 59
8.1.1.1. Volumetrik verim 59
8.1.1.2. Hava yakıt oranı 60
8.1.1.3. Efektif motor gücü 61
8.1.1.4. Fren özgül yakıt tüketimi 63
8.1.1.5. Fren özgül enerji tüketimi 65
8.1.1.6. Fren termik verim 66
8.1.1.7. Yanma verimi 68
8.1.1.8. Egzoz gaz sıcaklığı 69
8.1.2. Yanma karakteristikleri 71

8.1.2.1. Silindir içi gaz basıncı 71
8.1.2.2. Isı dağılımı 74
8.1.3. Egzoz emisyonları 82
8.1.3.1. Özgül HC emisyonu 82
8.1.3.2. Özgül NO emisyonu 84
8.1.3.3. Özgül CO_2 emisyonu 85
8.2. Bor Oksit Nanopartikül İlaveli Test Yakıtlarının Performans, Emisyon ve Yanma Karakteristikleri 87
8.2.1. Motor performansı 87
8.2.1.1. Volumetrik Verim 87
8.2.1.2. Hava-yakıt oranı 88
8.2.1.3. Efektif motor gücü 89
8.2.1.4. Fren özgül yakıt tüketimi 90
8.2.1.5. Yanma verimi 91
8.2.1.6. Fren özgül enerji tüketimi 92
8.2.1.7. Fren termik verim 93
8.2.1.8. Egzoz gaz sıcaklığı 95
8.2.2. Yanma karakteristikleri 96
8.2.2.1. Silindir içi gaz basıncı 96
8.2.2.2. Isı dağılımı 99
8.2.3. Egzoz emisyonları 106
8.2.3.1. Özgül HC emisyonu 106
8.2.3.2. Özgül NO emisyonu 107
8.2.3.3.Özgül CO_2 emisyonu 108
9. SONUÇLAR VE ÖNERİLER 110
KAYNAKLAR 114

EKLER 137

Ek-1 Biyodizelin analiz sonuçları 137

ÖZET

BİYODİZEL n-OKTANOL YAKIT KARIŞIMINA NANOPARTİKÜL İLAVESİNİN MOTOR PERFORMANSI VE YANMA ÜZERİNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ

Bu çalışmada, biyodizel, n-oktanol ve nanopartikül karışımlarının motor performansı, egzoz emisyonları ve yanma karakteristiklerine etkisi incelenmiştir. Deneysel çalışma için altı farklı test yakıtı hazırlanmıştır. Bu yakıtlar, saf dizel, saf biyodizel, biyodizel/n-oktanol karışımı, biyodizel/n-oktanol/100ppm çok duvarlı karbon nanotüp (MWCNT), biyodizel/n-oktanol/100ppm bor oksit (B_2O_3) ve biyodizel/n-oktanol/150ppm B_2O_3'tür. Deneysel çalışmada, 1,12 litre silindir hacmine sahip, tek silindirli, common rail direkt enjeksiyon sistemine sahip, ön püskürtmeli bir dizel motor kullanılmıştır. Deneyler, maksimum motor momentinin elde edildiği 1500 d/d sabit hızda ve dört farklı motor yükünde (%25, %50, %75 ve %100) gerçekleştirilmiştir. Çalışmada, biyodizel ve karışım yakıtlarının dizele göre motor performansı, egzoz emisyonları ve yanma karakteristikleri tartışılmıştır. Volumetrik verim yüke bağlı olarak tüm test yakıtlarında artmıştır. H/Y oranı MWCNT ilavesi ile genellikle azalmıştır. Motor gücü, fren termik verim (FTV) ve egzoz gaz sıcaklığının (EGS) maksimum değerleri ile fren özgül yakıt tüketimi (FÖYT) ve fren özgül enerji tüketiminin (FÖET) minimum değerleri saf dizel çalışmasında elde edilmiştir. Saf biyodizel çalışmasında yanma verimi diğer test yakıtlarına kıyasla daha yüksektir. Yakıta 100 ppm B_2O_3 ilavesi ile hidrokarbon (HC) emisyonu önemli ölçüde azaltılmıştır. Saf dizel ile çalışmada, azot monoksit (NO) ve karbondioksit (CO_2) emisyonları diğer test yakıtlarına kıyasla daha düşüktür. En yüksek CO_2 ise, 150 ppm B_2O_3 katkısı ile ölçülmüştür. MWCNT ile çalışmada, tüm yük şartlarında maksimum silindir içi gaz basıncı, saf dizel kullanımı ile ölçülmüştür. %25 ve %50 yük şartlarında 100 ppm B_2O_3 katkısının silindir içi gaz basıncını arttırdığı tespit edilmiştir. En kısa tutuşma gecikmesi (TG) süresi saf dizel ile sağlanmıştır. %25 yük şartlarında, en yüksek ısı dağılımı MWCNT katkısı sağlanmıştır. Karışım yakıta 100 ppm ve 150 ppm B_2O_3 katkısının %25 ve %50 yük şartlarında saf dizele kıyasla daha yüksek ısı dağılımı sergilediği gözlemlenmiştir.

ABSTRACT

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF ADDING NANOPARTICLES TO BIODIESEL n-OCTANOL FUEL MIXTURE ON ENGINE PERFORMANCE AND COMBUSTION

In this study, the effects of biodiesel, n-octanol and nanoparticle blends on engine performance, exhaust emissions and combustion characteristics were investigated. Six different test fuels were prepared for the experimental study. These fuels are pure diesel, pure biodiesel, biodiesel/n-octanol blend, biodiesel/n-octanol/100ppm multi walled carbon nanotube (MWCNT), biodiesel/n-octanol/100ppm boron oxide (B_2O_3) and biodiesel/n-octanol/150ppm B_2O_3. In the experimental study, a single-cylinder, common rail direct injection system, pre-injected a diesel engine with a cylinder volume of 1,12 liters was used. The experiments were carried out at a constant speed of 1500 rpm, at which the maximum engine torque was obtained, and at four different engine loads (25%, 50%, 75% and 100%). In the study, the engine performance, exhaust emissions and combustion characteristics of biodiesel and blended fuels compared to diesel were discussed. Volumetric efficiency increased in all test fuels depending on the load. The H/Y ratio generally decreased with the addition of nanoparticles. The maximum values of engine power, brake thermal efficiency and exhaust gas temperature and the minimum values of brake specific fuel consumption and brake specific energy consumption were obtained in pure diesel operation. Combustion efficiency is higher in pure biodiesel operation compared to other test fuels. By adding 100 ppm B_2O_3 to the fuel, hydrocarbon (HC) emissions were significantly reduced. In pure diesel operation, nitrogen monoxide (NO) and carbon dioxide (CO_2) emissions are lower compared to other test fuels. The highest CO_2 emissions were measured with fuels containing 150 ppm B_2O_3 additives. In the study with MWCNT, the maximum in-cylinder gas pressure under all load conditions was measured using pure diesel. It was determined that 100 ppm B_2O_3 additive increased in-cylinder gas pressure at 25% and 50% load conditions. The shortest ignition delay time was achieved with pure diesel. At 25% load conditions, the highest heat release rate was provided by MWCNT additive. It was observed that 100 ppm and 150 ppm B_2O_3 additives

to the blended fuel exhibited a higher heat release rate compared to pure diesel at 25% and 50% load conditions.

YENİLİK BEYANI

BİYODİZEL n-OKTANOL YAKIT KARIŞIMINA NANOPARTİKÜL İLAVESİNİN MOTOR PERFORMANSI VE YANMA ÜZERİNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ

Dizel motorlar, ulaşım, lojistik, enerji üretimi ve sanayi sektörü gibi çeşitli alanlarda kullanılmakta ve içten yanmalı motorların önemli bir bölümünü oluşturmaktadır. Ancak, dizel motorlarda kullanılan yakıtların ömrünün sınırlı olması, fiyat istikrarsızlığı, kirleticilerinin çevre ve insan sağlığı üzerindeki olumsuz etkileri alternatif yakıtların önemini arttırmaktadır. Biyodizel, dizel motorlarda kullanılabilirliği yüksek olan yenilenebilir bir alternatif yakıttır. Ülkemizin toprak ve iklim şartlarının tarıma elverişliliği, biyodizel hammaddesi olan yüksek yağ oranlı bitkilerin ve yağlı tohumların yetiştirilmesine olanak sağlamaktadır. Bitkisel yağlardan biyodizel üretiminin arttırılması, dışa bağımlılığı azalttığı gibi, tarım sektörüne de önemli ölçüde katkı sağlayacaktır. Ancak, biyodizelin saf halde dizel motorlarda kullanımının motor performansını düşürdüğü ve egzoz emisyonlarını arttırdığı gözlemlenmiştir. Son zamanlarda, yakıt katkı maddesi olarak nanopartiküllerin motor performansı, egzoz emisyonları ve yanma karakteristiklerine etkisi incelenmektedir. Literatür incelendiğinde, biyodizel/n-oktanol yakıt karışımına, MWCNT ve B_2O_3 nanopartikül katkısının motor performansı, egzoz emisyonları ve yanma karakteristikleri etkisi üzerine her hangi bir çalışmaya rastlanmamıştır. Bu başlangıç noktası çalışmamızın özgün niteliğini oluşturmaktadır. Diğer taraftan, test motoru, yüksek hacimli, common rail (ortak boru) pilot enjeksiyon sistemine sahiptir ve soğutma sıvısı ile motor yağı deney sırasında sabit sıcaklıkta tutulabilmektedir. Bu deneysel çalışmada, tek silindirli CRDI bir motorda n-oktanol biyodizel karışımlarına nanopartikül ilavesinin kullanılabilirliği test edilmiştir.

SEMBOLLER

Al_2O_3 : Alüminyum trioksit

A_{duvar} : Silindir duvar yüzey alanı (m^2)

A_p : Pistonun kesit alanı (m^2)

B_2O_3 : Bor oksit (Dibor trioksit)

CeO_2 : Seryum dioksit

C_m : Ortalama piston hızı (m/s)

CN : Siyanür

CO : Karbonmonoksit

CO_2 : Karbondioksit

c_p : Sabit basınçta özgül ısı (kJ/(kg·K))

CuO : Bakır oksit

c_v : Sabit hacimde özgül ısı (kJ/(kg·K))

D : Silindir çapı (m)

FeO_2 : Demir oksit

GNP : Grafen nanoplatelet

GO : Grafen oksit

HC : Hidrokarbon

HCN : Hidrojen siyanür

h_g : Konvektif ısı transfer katsayısı (W/m^2K)

HNO_3 : Nitrik asit

H_2O : Su

H_u : Alt ısıl değer (MJ/kg)

$\boldsymbol{k}$: Özgül ısılar oranı

KOH : Potasyum hidroksit

$\boldsymbol{l}$: Litre

$\boldsymbol{L_{kol}}$: Biyel kolu uzunluğu (m)

$\boldsymbol{m}$: Kütle (kg)

$\boldsymbol{M_d}$: Motor döndürme momenti (Nm)

Mg : Magnezyum

$\boldsymbol{\dot{m}_{g,H}}$: Giriş havasının kütlesel debisi (kg/h)

Mn : Mangan

$\boldsymbol{\dot{m}_{t,H}}$: Silindire giren teorik havanın kütlesel debisi (kg/h)

$\boldsymbol{\dot{m}_y}$: Kütlesel yakıt tüketimi (kg/h)

$\boldsymbol{n}$: Motor devri (d/d)

NaOH : Sodyum hidroksit

N_2 : Azot gazı

$\boldsymbol{N_e}$: Efektif güç (kW)

NO : Azot monoksit

NO_2 : Azot dioksit

N_2O : Nitröz oksit

N_2O_3 : Diazot trioksit

N_2O_5 : Azot pentaoksit

NO_x : Azot oksitler

O_2 : Oksijen gazı

OH : Hidroksit

P_0 : Deney ortamı basıncı (kPa)

P_{atm} : Atmosfer basıncı (kPa)

P_g : Silindir içi gaz basıncı (kPa)

P_m : Emme manifoldu hava basıncı (kPa)

$\dot{Q}_{brüt}$: Brüt ısı dağılımı (J/^{o})

$\dot{Q}_{duvar}$: Silindir duvarından ısı iletim hızı (J/s)

$\dot{Q}_{net}$: Net ısı dağılımı (J/^{o})

Q_T : Motora verilen toplam enerji (kJ)

R : İdeal gaz sabiti (kJ/kg K)

R_u : Evrensel gaz sabiti (J/mol K)

r_k : Krank mili yarıçapı (m)

S : Kurs boyu (m)

SO_x : Kükürt oksitler

T : Sıcaklık (K)

t : Zaman (s)

T_0 : Deney ortamı sıcaklığı (K)

T_{duvar} : Silindir duvar yüzey sıcaklığı (K)

T_g : Silindirdeki kütle ortalamalı gaz sıcaklığı (K)

T_m : Emme manifoldu hava sıcaklığı sıcaklığı (K)

TiO_2 : Titanyum dioksit

U : Toplam iç enerji (kJ)

V_H : Strok hacmine alınan gerçek hava hacmi (m^3)

V_s : Strok hacmine teorik olarak giren hava hacmi, strok hacmi (m^3)

$\boldsymbol{V_y}$: Yanma odası hacmi (m^3)

$\boldsymbol{W_e}$: Çıkış milinden alınan iş (kJ)

$\boldsymbol{X}$: Ölçülen değerler

$\boldsymbol{\overline{X}}$: X değişkenlerinin ortalaması

$\boldsymbol{z}$: Silindir sayısı

$\boldsymbol{\Delta t}$: ΔV hacmindeki yakıtın tüketilme zamanı (s)

$\boldsymbol{\Delta V}$: Harcanan yakıt hacmi (ml)

$\boldsymbol{\varepsilon}$: Sıkıştırma oranı

$\eta_{\boldsymbol{t}}$: Termik verim

$\eta_{\boldsymbol{v}}$: Volumetrik verim

$\eta_{\boldsymbol{y}}$: Yanma verimi

$\boldsymbol{\rho_H}$: Hava yoğunluğu (kg/m^3)

$\boldsymbol{\rho_{hava,in}}$: Giriş havası yoğunluğu

$\boldsymbol{\rho_k}$: Karışım yakıtın yoğunluğu (kg/m^3)

$\boldsymbol{\rho_y}$: Yakıtın yoğunluğu (kg/m^3)

KISALTMALAR

AÖN : Alt ölü nokta

CNT : Karbon nanotüp

CRDI : Common rail direct injection

E : Toplam enerji (kJ)

EKAO : Egzoz kütle akış oranı (kg/h)

FÖET : Fren özgül enerji tüketimi (MJ/kWh)

FÖYT : Fren özgül yakıt tüketimi (g/kWh)

FTV : Fren termik verim

kHz : Kilohertz

KMA : Krank mili açısı (°)

mg : Miligram

MWCNT : Çok duvarlı karbon nanotüp

nm : Nanometre

PM : Partikül madde

ppm : Milyonda bir birim

rpm : Dakikadaki devir adedi

SDS : Sodyum dodesil sülfat

$\boldsymbol{SS_k}$: Karışım yakıtın setan sayısı

STD : Standart sapma

TG : Tutuşma gecikmesi

ÜÖN : Üst ölü nokta

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 3.1. Dizel motorlarda yanma safhaları 15
Şekil 5.1. Nano yakıtın ikincil atomizasyonu..... 29
Şekil 5.2. Grafen, SWCNT, DWCNT ve MWCNT'nin yapısal görünümü..... 30
Şekil 5.3. Kristal yapıda bulunan B_2O_3 31
Şekil 6.1. Krank biyel mekanizmasının şematik görünümü..... 41
Şekil 7.1. MWCNT ve B_2O_3 nanopartikülleri..... 49
Şekil 7.2. Nanopartikül ölçümünde kullanılan hassas terazi..... 50
Şekil 7.3. Ultrasonik karıştırıcı 50
Şekil 7.4. Deney donanımının şematik görünümü 51
Şekil 7.5. Deney motoru ve dinamometre..... 53
Şekil 7.6. Egzoz gaz analizörü 55
Şekil 7.7. Deney yakıtları..... 57
Şekil 8.1. Motor yüküne bağlı volumetrik verimin değişimi 60
Şekil 8.2. Motor yüküne bağlı hava-yakıt oranının değişimi..... 61
Şekil 8.3. Efektif motor gücünün yüke bağlı değişimi..... 63
Şekil 8.4. Fren özgül yakıt tüketiminin yüke bağlı değişimi..... 64
Şekil 8.5. Motor yüküne bağlı fren özgül enerji tüketimi 66
Şekil 8.6. Motor yüküne bağlı FTV'nin değişimi 68
Şekil 8.7. Motor yüküne bağlı yanma verimi..... 69
Şekil 8.8. Egzoz gaz sıcaklığının yüke bağlı değişimi..... 71
Şekil 8.9. %25 yükte silindir gaz basıncı ve ısı dağılımı 78
Şekil 8.10. %50 yükte silindir gaz basıncı ve ısı dağılımı 79
Şekil 8.11. %75 yükte silindir gaz basıncı ve ısı dağılımı 80
Şekil 8.12. Tam yükte silindir gaz basıncı ve ısı dağılımı 81
Şekil 8.13. Motor yüküne bağlı özgül HC emisyonu..... 83
Şekil 8.14. Motor yüküne bağlı özgül NO emisyonlarının değişimi 85
Şekil 8.15. Motor yüküne bağlı özgül CO_2 emisyonunun değişimi..... 86
Şekil 8.16. Motor yüküne bağlı volumetrik verimin değişimi 88
Şekil 8.17. Motor yüküne bağlı hava-yakıt oranının değişimi..... 89

Şekil 8.18. Efektif motor gücünün yüke bağlı değişimi 90
Şekil 8.19. Fren özgül yakıt tüketiminin yüke bağlı değişimi 91
Şekil 8.20. Motor yüküne bağlı yanma verimi 92
Şekil 8.21. Motor yüküne bağlı fren özgül enerji tüketimi 93
Şekil 8.22. FTV'nin yüke bağlı değişimi 94
Şekil 8.23. Egzoz gaz sıcaklığının motor yüküne bağlı değişimi 96
Şekil 8.24. %25 yükte silindir gaz basıncı ve ısı dağılımı 102
Şekil 8.25. %50 yükte silindir gaz basıncı ve ısı dağılımı 103
Şekil 8.26. %75 yükte silindir gaz basıncı ve ısı dağılımı 104
Şekil 8.27. Tam yükte silindir gaz basıncı ve ısı dağılımı 105
Şekil 8.28. HC emisyonunun yüke bağlı değişimi 107
Şekil 8.29. NO emisyonunun yüke bağlı değişimi 108
Şekil 8.30. CO_2 emisyonunun yüke bağlı değişimi 109

TABLO LİSTESİ

Sayfa

Tablo 5.1. Farklı tür hammaddelerden üretilen biyodizelin yakıt özellikleri 25
Tablo 5.2. Alkol yakıtların yakıt özellikleri..... 26
Tablo 6.1. Motor performans parametreleri ve emisyonların standart sapma değerleri 46
Tablo 7.1. n-Oktanolün fizyokimyasal özellikleri 47
Tablo 7.2. Sodyum dodesil sülfat özellikleri 48
Tablo 7.3. Çok duvarlı karbon nanotüplere ait özellikler 48
Tablo 7.4. Boron oksit nanopartikülüne ait özellikler 49
Tablo 7.5. Deney donanımında mevcut olan cihazlar ve hassasiyetleri 52
Tablo 7.6. Deney motorunun teknik özellikleri 52
Tablo 7.7. Deney motorunun 1500 d/d'de yüke bağlı püskürtme basıncı ve avansı 54
Tablo 7.8. Egzoz gaz analizörüne ait teknik özellikler 54
Tablo 7.9. Deney yakıtlarının fiziksel ve kimyasal özellikleri 56

1.GİRİŞ

İçten yanmalı motorlarda hareket enerjisi, fosil kökenli yakıtların kullanımı ile elde edilmektedir. Günümüze kadar artmakta olan ve gelecekte de artmaya devam edeceği öngörülen araç sayısıyla birlikte, fosil yakıtların kullanımını da artmaktadır. Ancak, bu yakıt kaynaklarının gelecekte tükeneceği kaygısı, fiyatlarındaki istikrarsızlıklar, kullanımları sonucunda meydana getirdikleri zararlı emisyonlar ve buna bağlı olarak emisyon sınırlarının düşürülmesi bir takım zorlukları beraberinde getirmektedir. Bu nedenle, araştırmacıların odağında alternatif yakıtlar ile ilgili çalışmalar yer almaktadır (Balki, 2013).

Ağır ve hafif taşıtlar ile güç üretiminin istendiği diğer alanlarda dizel motorlar kullanılmaktadır. Dizel motorlarda, HC, azot oksitler (NO_x), karbonmonoksit (CO), kükürt oksitler (SO_x) ve is emisyonları çevre için zararlı olan önemli kirleticilerdendir (Aalam ve ark., 2015). Bu kirleticiler, başta küresel ısınma olmak üzere, çevre kirliliği ve asit yağmurlarının oluşumuna neden olarak, canlı yaşamı üzerinde ciddi derecede tehdit oluşturmaktadır. Dizel motorlardan kaynaklanan kirleticilerin bu etkilerinin azaltılması için verimli bir yanma olayının sağlanması gerekmektedir. Geleneksel yakıtların özelliklerinin iyileştirilmesi yanma verimini olumlu yönde etkileyebilmektedir. Bir diğer çözüm de dizel motorlarda alternatif yakıt kullanımıdır. Dizel motorlarda alternatif yakıt olarak biyodizel, alkol yakıtlar ve bu yakıtların belirli yüzdelerde dizel yakıt ile harmanları kullanılabilmektedir. Biyodizel oksijen içeren, yenilenebilir, bitkisel, hayvansal ve atık kızartma yağlarından üretilebilmektedir. Ayrıca, dizel motorlarda herhangi bir modifikasyona ihtiyaç duyulmadan kullanımı avantajları arasındadır. Biyodizelin enerji içeriğinin dizel yakıtından düşük olması FÖYT'yi arttırmaktadır. Ayrıca, yoğunluğunun ve viskozitesinin yüksek, uçuculuk özelliğinin düşük olması da atomizasyon sürecini kötüleştirmektedir (Krupakaran ve ark., 2016; Nour ve ark., 2018).

Dizel motorlarda kullanılabilen ve bünyesinde oksijen ihtiva eden bir diğer yakıt türü alkollerdir. Metanol, etanol, propanol, bütanol, pentanol, oktanol ve dekanol vb. çeşitli oksijenli yakıtlardır. Metanol ve etanolün (kısa zincirli) karbon içeriğinin düşük olması nedeniyle daha düşük yoğunluğa, viskoziteye, ısıl değere ve setan sayısına sahiptir. Ayrıca, bu hafif alkoller yağlayıcılık özellikleri zayıf olmakla birlikte yüksek gizli buharlaşma ısısına sahiptir. Bu özellikleri nedeniyle, dizel motorlardan ziyade benzinli

motorlarda kullanımı daha uygundur (Şanlı ve ark., 2022; Wang ve ark., 2022). Üç ve daha fazla karbon sayısına sahip propanol, bütanol, oktanol ve hekzanol (uzun zincirli alkoller) gibi yüksek alkoller, hafif alkollere kıyasla daha yüksek ısıl değere, viskoziteye, setan sayısına, yoğunluğa ve daha iyi yağlama özelliğine sahiptir. Ayrıca, hidrofobik ve düşük polarlığı sayesinde dizel yakıtı ile faz ayrışması olmadan karışabilmektedir. Yüksek alkollerin bu olumlu özellikleri, dizel motorlarda kullanımını uygun hale getirmektedir (Şanlı ve ark., 2022; Yadav ve ark., 2023). Yüksek alkollerden olan n-oktanol, dizel yakıt özelliklerine yakın olması ve düşük polar özelliği sayesinde dizel ve biyodizel yakıtları ile belirli oranlarda karışım halinde kullanılabilmektedir (Devarajan ve ark., 2018; Ashok ve ark., 2019; Atabani ve ark., 2020).

Son zamanlarda, dizel ve alternatif dizel yakıtlarına nanopartikül katkı maddelerinin ilavesine yönelik çeşitli çalışmalar yapılmaktadır. Nanopartiküllerin yakıtlara ilavesi (nanoyakıt) ile motor performansı, egzoz emisyonları ve yanma karakteristiklerini iyileştirdiğine yönelik çok sayıda çalışma yapılmıştır (El-Seesy ve ark., 2017; Chen ve ark., 2018; Çakmak, 2021; Ge, ve ark., 2022). Nanopartiküler, yüksek yüzey alanı/hacim oranına sahiptirler. Eklendikleri yakıtın termal iletkenliğini arttırmakta ve tutuşma özelliklerini iyileştirmektedir. Nanopartiküllerin, yakıtın yanma davranışı üzerinde olumlu etkileri olduğu görülmüştür. Nanopartiküllerin farklı dozajlarda, farklı yakıt ve yakıt karışımlarında, motor performansı, egzoz emisyonları ve yanma karakteristikleri üzerine etkileri literatür kısmında derinlemesine incelenmiştir.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Taşıt kaynaklı çevreye salınan emisyonların artışı ve günden güne artan enerji gereksinimi, alternatif yakıt arayışları ve yakıt modifikasyonlarına olan ilgiyi arttırmaktadır. Ayrıca, sınırlı rezerve sahip olan petrolün tükeneceği endişesi yenilenebilir yakıtların kullanımını da arttırmaktadır. Bu bağlamda, dizel yakıtına alternatif olarak biyodizel sıklıkla tercih edilmektedir. Buna ilaveten, alkol yakıtlar da belirli oranlarda dizel veya biyodizel yakıtlar ile harmanlanarak test çalışmaları yapılmaktadır. Dizel yakıta, alternatif yakıtlara ve harmanlanmış yakıtlara çeşitli katkı maddeleri eklenerek de deneysel çalışmalar gerçekleştirilmektedir. Katkı maddesi eklenerek yakıt özelliklerini iyileştirmeye yönelik yapılan yöntemlerden birisi yakıtlara nanopartikül ilavesidir. Nanopartiküller belirli dozda yakıtlara eklenerek motor performansı ve emisyonlara etkileri incelenmektedir. Alternatif yakıtlara nanopartikül ilavesi ile ilgili bazı çalışmalardan elde edilen sonuçlara aşağıda değinilmiştir.

Balaji ve Cheralathan, (2014) tek silindirli, doğal emişli bir dizel motorda biyodizel yakıtına CNT ilavesinin performans ve emisyonlar üzerine etkilerini incelemişlerdir. İlgili çalışmada, biyodizelin yüksek viskozite ve karışım oluşumunun yetersizliği sebebiyle FTV'nin dizel yakıtına kıyasla azaldığı vurgulanmıştır. Biyodizelin ısıl değerinin düşük olması nedeniyle FÖYT'de artış yaşandığı belirtilmiştir. Biyodizele CNT ilavesi yakıtın, setan sayısı ile ısıl değerini bir miktar yükselttiği ve TG süresini kısalttığı belirlenmiştir. Bu özelliklerdeki değişimin, FTV ile FÖYT'de olumlu sonuçlar doğurduğu vurgulanmıştır. CNT katkılı biyodizel, saf biyodizel ile kıyaslandığında NO emisyonunda azalma kaydedilmiştir. Bu azalmanın, TG süresinin kısalmasına bağlı olarak tepe basınç ve maksimum basınç artış hızının düşük olmasına sebep olduğu sonucuna vakıf olunmuştur. CNT katkılı yakıt karışımı dizel yakıtı ile karşılaştırıldığında is emisyonunda artış, saf biyodizel ile karşılaştırıldığında ise azalma yaşandığı bildirilmiştir. Bu iyileşmenin daha homojen karışımın oluşumundan kaynaklandığı sonucuna varılmıştır. CNT katkılı yakıt harmanı saf biyodizel ile kıyaslandığında HC emisyonunda azalma gerçekleştiği, fakat CNT dozajının 200 ppm üzerine çıkarıldığında yakıtın kirlenmesi nedeniyle HC emisyonunda artış görülmüştür. CNT katkılı yakıtın kullanımı sonrası oluşan CO miktarının saf biyodizel yakıtına kıyasla azaldığı ifade edilmiştir. CO'daki bu azalma CNT'nin TG süresini kısaltmasına atfedilmiştir. Ayrıca,

CNT'nin yüksek yüzey alanı/hacim oranı, yakıtın ısıl iletkenliğini artırmaktadır. Böylece, yakıt zerreciklerinin yanma odasında optimum ölçüde buharlaştığı vurgulanmıştır. Bu azalmanın, CNT'nin TG süresini kısaltmasından ve yine CNT'nin yüzey alanı/hacim oranını arttırması neticesinde daha iyi bir ısı transferi sağlamasından kaynaklandığı sonucuna ulaşılmıştır.

Banapurmath ve ark., (2014a) dizel-biyodizel yakıt harmanına nanopartikül ilave ederek tek silindirli direkt enjeksiyonlu bir dizel motorda deneysel çalışma gerçekleştirmişlerdir. İlgili çalışmada biyodizel kullanımının, dizel yakıtına kıyasla emisyonlarda artış oluşturduğu görülmüştür. Eklenen nanopartiküllerden MWCNT, saf biyodizel yakıtına kıyasla daha yüksek pik silindir basıncı, ısı dağılımı ve FTV'de iyileşme sağlanmıştır. HC, NO_x, CO ve is emisyonlarında, saf biyodizel yakıta kıyasla azalma sağlandığı sonucuna varılmıştır.

El Seesy ve ark., (2016) biyodizel-dizel karışım içerisine ilave edilen MWCNT dozajının, tek silindirli direkt enjeksiyonlu bir dizel motorda performans ve emisyonlar üzerine etkisini araştırmışlardır. Bu incelemede, nanotüp uzunluğu 1 ile 10 mikron arasında değişen ve çapları 10-15 nm olan MWCNT'ler 10, 20, 30, 40 ve 50 mg/l dozajlarda biyodizel-dizel yakıt harmanına ilave edilmiştir. 2000 rpm sabit hızda, farklı tork değerlerinde teste tabi tutmuşlardır. Dizel-biyodizel yakıt harmanıyla çalışmada motor performansında bir miktar azalma ve tüm çalışma koşullarında emisyon verilerinde artış gözlenmiştir. Dizel-biyodizel yakıt harmanına eklenen MWCNT'nin, bütün dozlarında motor performansında artış ve emisyonlarda önemli ölçüde azalma tespit edilmiştir. Emisyonlardaki maksimum azalmanın 30 mg/l doz MWCNT eklenmesiyle gerçekleştiği saptanmıştır. Motor performansı ise en fazla 50 mg/l doz MWCNT ilavesi ile mümkün olduğu vurgulanmıştır. En ideal motor performansı ve egzoz emisyonları için, optimum MWCNT dozajının 40 mg/l olduğu netleştirilmiştir.

Sharma ve ark., (2016) jatropha metil esteri ve lastik piroliz yağı yakıt harmanına nanopartikül ilavesinin tek silindirli direkt enjeksiyonlu bir dizel motorda performans ve emisyonlar üzerine etkilerini araştırmışlardır. Bu araştırmada, yakıt katkı maddesi olarak CNT ve seryum oksit (CeO_2) kullanılmıştır. CNT ilavesiyle CO, HC ve NO_x emisyonlarında azalmayla birlikte motor performansında iyileşme sağlandığı açıklanmıştır. Karışım yakıta 100 ppm CNT eklenmesiyle FÖET'de düşüş sağlandığı

vurgulanmıştır. Ayrıca, FTV'de artış yaşandığı saptanmıştır. Karışım yakıtlara nanopartikül eklenmesi duman opaklığının azaldığı üzerinde durulmuştur.

El Seesy ve ark., (2017) dizel-biyodizel yakıt harmanına farklı dozlarda MWCNT ilavesinin dizel motorda performans, yanma ve emisyonlar üzerinde etkilerini incelemişlerdir. Bu incelemede, B20 yakıtına 10, 20, 30, 40 ve 50 mg/l MWCNT ekleyerek farklı motor yükleri ve hızlarında testler gerçekleştirilmiştir. Sadece B20 kullanımının D100'e kıyasla emisyonlarda artış, motor performansında bir miktar düşüş gerçekleştiğine değinilmiştir. 50 mg/l MWCNT ilavesinin, B20 yakıtına kıyasla daha iyi bir FTV ve FÖYT'de azalma sağlandığı ifade edilmiştir. Bununla birlikte, aynı dozda MWCNT kullanımın maksimum silindir basıncı, maksimum basınç artış oranı, maksimum ısı dağılımının arttığı ve yanma özelliklerinin iyileştiği vurgulanmıştır. B20 yakıtına 20 mg/l dozda MWCNT ilavesinin emisyonlarda maksimum düşüş sağladığı gözlemlenmiştir. Performans, yanma ve emisyonlardaki iyileşmenin optimum olabilmesi için 40 mg/l dozda MWCNT eklenmesinin uygun olduğu sonucuna varılmıştır.

Ghanbari ve ark., (2017) dizel ve biyodizel-dizel harman yakıtlara nanopartikül ekleyerek motor performansı ve emisyonlardaki değişikleri incelemişlerdir. Bu çalışmada, kullanılan nanopartiküllerden biri olan MWCNT, yakıt içerisine 40, 80 ve 120 ppm dozlarında eklenmiştir. Dizel ve biyodizel yakıtlara nanopartikül ilavesinin D100 yakıtına kıyasla motor performansında artış, FÖYT'de düşüş yaşandığı dile getirilmiştir. Biyodizel-dizel yakıt karışımına MWCNT ilavesinin D100'e kıyasla CO_2 emisyonunda artış, CO emisyonunda ise önemli derecede azalma sağlanmıştır. Fakat, MWCNT kullanılan yakıtlarda HC emisyonunda artış yaşandığı gözlemlenmiştir. Karışım yakıtlara nanopartikül eklenmesiyle NO_x emisyonunda artış yaşandığı işaret edilmiştir.

Heydari-Malaney ve ark., (2017) dizel, biyodizel (%2) ve etanol (%4) yakıt karışımına CNT ilavesinin tek silindirli, dört zamanlı bir dizel motorda performans ve emisyon davranışlarına etkilerini incelemişlerdir. Bu çalışmada, yakıt içeriğine 20, 60 ve 100 ppm CNT katkısının tam yük ve farklı hızlardaki etkileri incelenmiştir. Bu yakıt harmanına 60 ppm CNT ilavesinin, saf dizel (D100) yakıtına kıyasla tork, güç ve FTV'de artış, FÖYT ve EGS'de düşüş gerçekleştiği gözlemlenmiştir. CO, HC ve is emisyonlarında azalma, NO_x emisyonunda ise artış yaşandığı saptanmıştır.

Hosseini ve ark., (2017) dizel-biyodizel karışımlarına eklenen CNT'nin tek silindirli, dört zamanlı ve hava soğutmalı bir dizel motorda performans ile egzoz emisyonları üzerine etkilerini araştırmışlardır. Bu çalışmada, test motoru tam yük şartlarında üç farklı hız testine tabi tutulmuştur. Yakıt harmanlarına CNT eklenmesiyle tüm motor devirlerinde güç, FTV ve EGS'de önemli ölçüde artış yaşandığı görülmüştür. Bununla birlikte, karışım yakıta CNT ilavesi ile birlikte FÖYT'de de önemli ölçüde azalma sağlanmıştır. Yapılan deneysel çalışmada kurum, HC ve CO emisyonlarında azalma sağlanırken, EGS'nin yükselmesine bağlı olarak NO_x emisyonunda artış yaşandığı gözlemlenmiştir. Buna ilaveten, CO ve CO_2 emisyonları arasında negatif bir istatiksel kolerasyon olduğunu belirtmişlerdir. Elde edilen bu sonuçların, CNT nanoparçacıklarının yakıt molekülleri arasındaki boşluklarda yer alması, viskoziteyi düşürmesi ve biyodizelin bünyesinde oksijen barındırması dolayısıyla yakıt özelliklerinin iyileşmesinden kaynaklandığı vurgulanmıştır. Bu etkiler sonucunda, yakıtın homojenliği, buharlaşması, yakıtın atomizasyonu gibi faktörlerin etkilendiği, böylece elde edilen performans ve emisyon değerlerini değiştirdiği sonucuna varılmıştır.

Devarajan ve ark., (2018) tek silindirli common rail direkt enjeksiyon (CRDI) sistemine sahip bir dizel motorda, biyodizel ve n-oktanol karışım yakıtların performans, yanma ve emisyon üzerine etkilerini incelemişlerdir. Araştırmada, n-oktanolün yanma sırasında katalitik etkiye katkıda bulunduğu ve yanma sürecini hızlandıran oksijen tamponu rolü üstlendiği bildirilmiştir. Çalışmada %10, %20 ve %30 oranlarda n-oktanolü biyodizel ile harmanlanıştır. n-oktanolün biyodizel ile karışım halinde kullanılmasının motor performansı, yanma ve emisyon üzerinde olumlu etkileri olduğunu kanaatine varılmıştır. n-oktanol oksitleyici katalizör olması sebebiyle HC ve CO emisyonlarını azaltmada etkili olduğunu iddia edilmiştir. Ayrıca, NO_x emisyonlarını da azalttığı gözlemlenmiştir. Bununla birlikte, yakıt tüketimi ve FTV'de önemli derecede iyileşme sağlanmıştır. Karışımda n-oktanol bulunması TG süresini azalttığı ve yanma sürecinin gelişmesinde etkili olduğu vurgulanmıştır.

Najafi, (2018) dizel-biyodizel yakıt harmanına nanopartikül kullanımının doğal emişli direkt enjeksiyonlu bir dizel motorun yanma karakteristiği üzerine etkisini incelemiştir. Bu deneysel incelemede kullanılan nano katkılardan biri MWCNT'dir. Saf biyodizel ve MWCNT ilaveli biyodizel karışımı ile çalışmada, difüzyon yanma safhasındaki ısı yayılım hızının yakıt harmanın oksijen içeriği nedeniyle D100'den daha yüksek değere

ulaştığı belirtilmiştir. Biyodizel yakıta 120 ppm dozda MWCNT ilavesi ile pik basıncın yükseldiği sonucuna varılmıştır. Aynı karışımda TG süresinin D100'e kıyasla azaldığını gözlemlenmiştir. Bununla birlikte, motor gücü ve torkunun yükseldiği, FÖYT'nin azaldığı sonucuna ulaşılmıştır. Aynı karışım için HC ve CO emisyonlarının D100 ile kıyaslandığında azaldığı kaydedilmiştir. Fakat, bu karışım yakıtının kullanımının CO_2 ve NO_x emisyonlarını arttırdığı kanaatine varılmıştır.

Akyüz, (2019) aspir yağından elde ettiği biyodizele oktanol ilavesinin ağır hizmet tipi dört silindirli direkt enjeksiyonlu bir dizel motorda performans ve egzoz emisyonlarına etkisini incelemişlerdir. Deneysel çalışmada, 1500 rpm sabit devirde farklı yük testleri gerçekleştirilmiştir. Biyodizel ve oktanolü saf halde kullandığında, TG süresinin uzadığı kanaatine varılmıştır. Biyodizele %50 oranında oktanol ilavesinin (OB50) ve dizel yakıta %50 oktanol ilavesinin (OD50) TG süresinin bakımından, D100 ile benzer olduğu saptanmıştır. OB50'nin, saf biyodizele kıyasla daha verimli bir yanma ve düşük FÖYT sağladığı sonucuna varılmıştır. Düşük yüklerde, saf biyodizel ile OB50'nin diğer test yakıtlarına göre HC emisyonunun azaldığı tespit edilmiştir. Yüksek yüklerde ise saf oktanol, OB50 ve OD50 yakıtlarının diğer test yakıtlarına kıyasla HC emisyonunu azalttığı bildirilmiştir.

Alenezi ve ark., (2019) tek silindirli dört zamanlı direkt enjeksiyonlu bir dizel motorda, biyodizel-dizel yakıt harmanına 50, 100 ve 150 ppm dozajlarda karbon nanotüp (CNT) eklenmesinin performans ve yanma üzerindeki değişimleri tespit etmek amacıyla bir dizi test gerçekleştirmişlerdir. Deneysel çalışma 1800 rpm sabit devir düşük, orta ve maksimum yük şartlarında gerçekleştirilmiştir. Yakıt harmanında artan CNT miktarı ile motorun indike özgül yakıt tüketiminde iyileşme sağlanmıştır. Düşük motor yükünde 100 ppm CNT'nin ideal bir doz olduğunu sonucuna varılmıştır. Yakıt ekonomisindeki iyileşmenin, biyodizel ve CNT varlığından kaynaklı, oksijen ve yanma hızının yüksek olmasına bağlı olduğu vurgulanmıştır. Tüm çalışma şartlarında CNT katkısıyla daha yüksek basınç verileri sağlanmıştır.

Ashok ve ark., (2019) n-oktanol biyodizel karışımının tek silindirli direkt enjeksiyonlu bir dizel motorda performans, yanma ve emisyonlar üzerine etkisini araştırmışlardır. Bu çalışmada, biyodizel içerisine %10, %20, %30, %40 ve %50 oranlarda n-oktanol eklenmiştir. n-oktanolün bünyesinde oksijen mevcudiyetinin yakıtın ısıl değerini

düşürdüğü belirlenmiştir. Yakıt karışımlarındaki n-oktanol yüzdesindeki artışın TG'yi uzattığı, silindir içi basınç ve ısı dağılımında maksimum sonuçlar ürettiği gözlemlenmiştir. FTV'nin %30 oktanol değerlerine kadar arttığı, sonrasında ise azaldığı saptanmıştır. %50 oktanol oranı ile FÖYT'de %20 azalma sağlandığı tespit edilmiştir. Karışım içerisindeki n-oktanol oranının azaltılmasıyla, silindir içerisinde oluşturduğu soğutma etkisinin NO_x emisyonunu düşürdüğü vurgulanmıştır. Ancak, n-oktanolün zayıf tutuşma ve buharlaşma karakteristiği nedeniyle, CO ve duman emisyonlarında artışa neden olduğu vurgulanmıştır. HC emisyonlarının n-oktanolün daha fazla oksijen içeriğinden dolayı artış gösterdiğine vurgu yapılmıştır. n-oktanol yüzdesindeki artışın oksijen mevcudiyetini arttırdığı ve daha gelişmiş bir yanma sağladığı, dolayısıyla CO ve is emisyonunda azalmaya neden olacağı saptanmıştır.

El Seesy ve Hassan, (2019) tek silindirli direkt enjeksiyonlu bir dizel motorda, jatropha metil esteri ve n-bütanol yakıt harmanına nanopartikül ilavesinin performans ve emisyonlara etkisini incelemişlerdir. Bu deneysel çalışmada yakıt, %60'ı jatropha metil esteri ve %40'ı n-bütanol teşkil edecek şekilde karışım haline getirilmiştir. Bu yakıt karışımına nanopartikül olarak 50 mg/l dozda grafen oksit (GO), grafen nanoplatelet (GNP) ve MWCNT eklenerek üç farklı karışım oluşturulmuştur. Jatropha metil esterine n-bütanol ilavesi, pik silindir basıncını ve basınç yükselme oranını arttırdığı tayin edilmiştir. Yakıt içerisinde n-bütanol varlığının TG süresini uzattığı, bunun sonucunda maksimum basıncın ve basınç yükselme oranın gecikmeli olarak ortaya çıkmasına neden olduğu kaydedilmiştir. Karışım yakıt içerisine MWCNT ilavesiyle TG süresinin kısaldığı, yanma hızının arttığı, bu nedenle düşük silindir basıncı ve ısı dağılımının pozisyonunun değiştiği rapor olarak sunulmuştur. Karışım yakıta MWCNT ilavesinin saf haldeki karışım yakıta kıyasla FTV'de artış ve FÖYT'de önemli derecede düşüş meydana geldiği bildirilmiştir. Aynı zamanda, CO, HC, NO_x ve is emisyonlarında ciddi ölçüde azalma sağlandığını belirlemişlerdir. Aynı karışıma nanopartikül eklenmesinin, D100'e kıyasla CO, HC ve NO_x emisyonlarında düşüş yaşandığı sonucuna varılmıştır.

Ramakrishnan ve ark., (2019) biyodizel yakıta CNT ilavesinin tek silindirli dört zamanlı bir dizel motorda emisyonlar üzerine etkisini araştırmışlardır. Bu çalışmada, biyodizele 50 ve 100 ppm dozajda CNT eklenmiştir. Deneysel çalışma 1500 rpm sabit devir ve beş farklı yük şartlarında gerçekleştirilmiştir. Bütün yük koşullarında CNT katkılı biyodizel, saf biyodizel ile kıyaslandığında NO_x, CO, HC ve is emisyonlarında azalma saptanmıştır.

Sunil ve ark., (2019) süt ürünleri atığı ile elde ettiği biyodizel yakıt karışımına katalizör olarak MWCNT ilavesinin tek silindirli dört zamanlı bir dizel motora uygunluğunu araştırmışlardır. Bu araştırmada B20 yakıtına 125, 250, 375, 500 ppm dozajlarda MWCNT ilavesinin FTV, FÖYT ve emisyonlar üzerine etkileri belirlenmiştir. Biyodizel karışım yakıtlarının ısıl veriminin genellikle dizel yakıtından daha yüksek olduğu kanaatine ulaşılmıştır. 250 ppm'e kadar MWCNT ilavesinin verimlilikte daha fazla gelişme gösterdiği, bu miktardan daha yüksek dozlarda iyileşmenin azaldığı sonucuna varmışlardır. B20 karışımına MWCNT ilavesi HC ve CO emisyonlarını azalttığı, nanopartikül dozajının artışıyla daha da iyileştiği not edilmiştir. Dizel yakıtına kıyasla, B20 ile çalışmada NO_x emisyonlarının arttığı gözlemlenmiştir. B20 yakıt karışımına MWCNT ilavesinin NO_x emisyonunu azalttığı vurgulanmıştır.

Vellaiyan, (2019) tek silindirli, dört zamanlı, doğal emişli bir dizel motorda, biyodizel, dizel ve biyodizel-dizel referans yakıtlarına CNT ilavesinin performans, yanma ve emisyonlara etkilerini incelemiştir. Deneysel çalışmada saf biyodizel ve harmanının, D100'e kıyasla TG süresinde artış, silindir içi basınç ve net ısı yayılımında düşüş sergilediği ifade edilmiştir. Biyodizel ve karışımlarının FÖYT'yi arttırdığı buna rağmen, verimli yanma sonucunda FÖET ve EGS'yi düşürdüğü tayin edilmiştir. Saf biyodizel ve biyodizel karışımı, D100 ile kıyaslandığında NO_x, HC, CO, CO_2 ve duman emisyonlarının azalmasını desteklediği ifade edilmiştir. Referans yakıtlara CNT ilavesinin performans, emisyon ve yanma karakteristiklerini önemli ölçüde iyileştirdiği bildirilmiştir.

Devarajan ve ark., (2020) dört zamanlı tek silindirli bir dizel motorlarda, biyodizel-oktanol yakıt harmanlarının performans, yanma ve emisyonlara etkilerini incelemişlerdir. İlgili deneysel çalışmada, biyodizel içerisine %10 ve %20 oktanol ilavesinin duman emisyonunun azaldığı tespit edilmiştir. Karışımdaki alkol oranın artışı ile NO_x emisyonunun azaldığı gözlemlenmiştir. Ayrıca, karışım yakıtın setan sayısın yüksek olmasından dolayı HC emisyonu azaldığı vurgulanmıştır. Karışımdaki oktanol içeriğinin yüksek gizli buharlaşma ısısı nedeniyle TG süresini kısalttığı belirlenmiştir. Bu nedenle, CO emisyonun saf biyodizele göre daha da azaldığı belirlenmiştir. FTV ve FÖYT'nin, oktanol yüzdesinin artışıyla iyileştiği vurgulanmıştır. Karışım yakıtlar içerisinde en iyi performansın %20 oktanol miktarında gerçekleştiği sonucuna ulaşılmıştır.

Gad ve Gadow, (2020) tek silindirli direkt enjeksiyonlu bir motorda biyodizel ve CNT karışımının, yanma karakteristikleri ve egzoz emisyonları üzerine etkisini farklı motor yüklerinde incelemişlerdir. Bu çalışmada, D100, B20 ve farklı oranlarda B20 yakıtına CNT ilavesi incelenmiştir. B20'ye kıyasla CNT katkılı biyodizelin FÖYT'sinde azalma sağlanmıştır. CNT dozunun arttırılmasıyla, B20'ye kıyasla FTV'de iyileşme kaydedilmiştir. EGS tüm yakıtlara kıyasla 100 ppm CNT ilaveli çalışmada en yüksek değerlere ulaştığı kaydedilmiştir. Duman, CO ve HC emisyonlarının azaltımında, en iyi CNT dozajının 100 ppm olduğu saptanmıştır. CNT dozunun artışıyla silindir içi sıcaklıklarında ve adyabatik alev sıcaklığının yükselmesinden kaynaklı olarak NO_x emisyonlarının atış gösterdiği sonucuna varılmıştır.

Gad ve Jayaraj, (2020) hint fıstığı (jatropha) biyodizel ile nanopartikül karışımının tek silindirli direkt enjeksiyonlu bir dizel motorun performans ve emisyonlar üzerine etkisini incelemişlerdir. Bu deneysel incelemede, B20'ye alüminyum oksit (Al_2O_3), titanyum dioksit (TiO_2) ve CNT nanopartikül katkı maddeleri 25, 50 ve 100 ppm dozajlarda eklenmiştir. B20'ye CNT katkısı eklendiğinde daha düşük CO, duman ve NO_x meydana geldiği ifade edilmiştir. 50 ppm CNT katkısının, B20 yakıtına kıyasla CO emisyonunda %35, NO_x emisyonunda %62 azalma sağladığı vurgulanmıştır. 100 ppm CNT ilavesiyle B20 yakıtına göre duman emisyonunda %50 azalma kaydedilmiştir. B20'ye 50 ppm doz CNT ilavesinin belirli yüklerde diğer tüm yakıtlardan daha düşük CO ve NO_x emisyonu oluşturduğu saptanmıştır. B20'ye 100 ppm CNT katkısının belirli motor yüklerinde diğer test yakıtlarına kıyasla daha düşük duman emisyonu ölçülmüştür.

Mujtaba ve ark., (2020) dizel-biyodizel harmanına (B30) alkol ve nanopartikül ilavesinin tek silindirli direkt enjeksiyonlu bir dizel motorda performans ve emisyonlar üzerine etkilerini test etmişlerdir. Deneysel çalışmada B30 ve alkol karışımının en yüksek fren gücünü düşürdüğü iddia edilmiştir. 100 ppm CNT ilavesinin fren gücünü düşürdüğü tespit edilmiştir. Yine CNT ilaveli yakıt karışımı ile FÖYT'de azalma sağlanmıştır. CNT ilavesinin, B30'a kıyasla FTV'de artış gözlemlenmiştir. B30'a CNT ilavesinin, NO_x emisyonlarında en fazla düşüşü sağladığı ancak, HC emisyonlarında maksimum artışı gerçekleştiği sonucuna varılmıştır.

Ninawe ve Tariq, (2020a) pamuk çekirdeği biyodizel yakıtına CNT ilavesinin değiştirilebilir sıkıştırma oranlı tek silindirli bir dizel motorda performans ve emisyonlar

etkilerini deneysel olarak incelemişlerdir. Bu araştırmada, D100, B10, B15, B20 yakıt ve yakıt karışımlarıyla, daha sonra B10, B15 ve B20 yakıt karışımına 50 ppm CNT ilave ederek farklı motor yüklerinde testler gerçekleştirilmiştir. Çalışmada, optimum güç, tork, FTV ve FÖYT değerlerinin elde edilmesi için en ideal karışımın B15'e 50 ppm CNT ilavesinin olduğu tanımlanmıştır. Aynı yakıt karışımı ile HC, CO ve duman opaklığı değerlerinin diğer test yakıtlarına kıyasla minimum değerlerde olduğu gözlemlenmiştir.

Ninawe ve Tariq, (2020b) dizel ve biyodizel harmanına katkı maddesi olarak MWCNT ilavesinin etkisini incelemişlerdir. Bu çalışmada, test motoru olarak değişken sıkıştırma oranlı tek silindirli bir dizel motor kullanılmıştır. Bu deneysel çalışmada öncelikle D100, B10 ve B15 yakıtları, ardından B10 ve B15 yakıt harmanlarına 100 ile 150 ppm dozajlarda MWCNT eklenmiştir. Dizel yakıta biyodizel ilavesiyle FTV ve FÖYT'de azalma gözlemlenmiştir. Ancak, biyodizel oranındaki artışın HC ve CO seviyesini arttırdığı not edilmiştir. Karışım yakıta MWCNT eklenmesi CO, HC ve is emisyonlarını azalttığının altı çizilmiştir. Karışım yakıt içerisindeki MWCNT konsantrasyonunun artması, ısıl verimle beraber ısı dağılımını arttırdığı, böylece yanma süresini kısaltmasıyla difüzyon yanma safhasını iyileştirdiği sonucuna varılmıştır. Diğer yakıt karışımları ve D100 yakıtına kıyasla B15'e 100 ppm MWCNT ilavesinin (B15C100), tork, FÖYT ve FTV'de optimum sonuçlar ürettiği saptanmıştır. En düşük HC, CO ve is emisyonunun yine B15C100 ile elde edildiğini tespit edilmiştir. Biyodizel katkısı olarak nanopartikül kullanımının yakıtlar açısından daha iyi bir oksitleyici rol oynadığına dikkat çekilmiştir. Bununla birlikte, nanopartiküllerin yakıtın viskozite ve yoğunluğunu azaltması nedeniyle dizel yakıtına daha fazla oranda biyodizel ilavesinin mümkün olabileceğini özellikle belirtmişlerdir.

Sekar ve ark., (2020) oktanol ile biyodizel karışımın tek silindirli dört zamanlı bir dizel motorda performans ve emisyonlara etkisini araştırmışlardır. Deneysel araştırmada, biyodizel içerisine %10 ve %20 oranlarında oktanol karıştırılmıştır. Oktanol, karışım yakıtın viskozite, yoğunluk ve setan sayısı özelliklerini geliştirmesinden kaynaklı olarak CO, HC, is ve NO emisyonlarında önemli derecede iyileşme sağlanmıştır. %20 oktanol ilavesiyle, motor performansı ve FTV'de yükselme, FÖYT'de ise azalma sağlanmıştır. Oktanol ilavesiyle maksimum basınç ile ısı dağılımının saf biyodizele kıyasla artış gösterdiği ve TG süresini uzattığı belirlenmiştir.

Soudagar ve ark., (2020) farklı oranlarda oktanol ile biyodizel ve biyodizel-dizel karışım yakıta MWCNT ilavesinin tek silindirli bir dizel motorda performans ve emisyonlara etkilerini incelemişlerdir. Bu çalışmada, nanopartikül katkılı yakıt harmanları ile karşılaştırma yapabilmek için %5, %10 ve %15 oranlarda oktanol, B20, B40, B60 ve B100 ile harmanlanmıştır. D100 ile motor performansı ve emisyonlarda en iyi sonuçlar elde edilmiştir. Oktanol ile biyodizel yakıt harmanlarının ve bu yakıtlara MWCNT ilavesinin performansın yanı sıra emisyon açısından önemli ölçüde iyileşme sağlandığı vurgulanmıştır. D100 ile kıyaslandığında tüm yakıt harmanlarında NO_x'in belirgin bir şekilde yükseldiğini tespit edilmiştir.

Sürer, (2020) dizel-biyodizel yakıt harmanına (B20) 25, 50, 75 ve 100 ppm olmak üzere dört farklı dozda MWCNT ilave etmiştir. Bu deneysel incelemede deney yakıtlarını, tek silindirli direkt enjeksiyonlu bir dizel motorda teste tabi tutarak yanma, motor performansı ve emisyonlardaki değişimleri incelenmiştir. Karışım içerisine MWCNT ilavesiyle silindir içi ısı transfer katsayısının artışından dolayı motor torku ve buna paralel olarak motor gücünün arttığı belirtilmiştir. 100 ppm MWCNT ilavesiyle FÖYT'de B20 yakıtına kıyasla önemli ölçüde düşüş sağlandığı netleştirilmiştir. Bununla birlikte, yakıt harmanı içerisinde nanopartikül mevcudiyetinin TG süresini kısalttığı, difüzyon yanma safhasında daha düşük ısı dağılımının gerçekleştiğine vurgu yapılmıştır. MWCNT katkılı yakıtın HC, CO ve is emisyonlarında düşüş yaşanırken, silindir içi basınç ve sıcaklığın artışıyla NO_x emisyonunda artış meydana geldiği bildirilmiştir.

Alenezi ve ark., (2021) tek silindirli direkt enjeksiyonlu bir dizel motorda biyodizel-dizel yakıt harmanlarına farklı dozlarda MWCNT ilavesinin yanma karakteristikleri ve emisyonlar üzerine etkilerini deneysel olarak araştırmışlardır. Bu deneysel araştırmada yakıtı karışımı olarak olarak B10, B20, B30 ve B40 kullanılmıştır. Her bir yakıt karışımına 50, 100 ve 150 ppm dozajlarda MWCNT eklenmiştir. B30 yakıt harmanına üç farklı dozda MWCNT ilavesinin CO_2 emisyonunda belirgin bir azalma meydana geldiği kaydedilmiştir. B20 yakıt harmanına ilave edilen MWCNT dozunun artışıyla CO_2 seviyesinde azalma eğilimi gösterdiği, ancak 50 ppm dozda MWCNT ilavesinin D100 ile karşılaştırıldığında CO_2 miktarında artış oluşturduğu kanaatine varılmıştır. B20 ve B40 kullanımının NO_x miktarını azalttığı sonucuna ulaşılmıştır. Ancak, B10 kullanımında NO_x emisyonu, MWCNT artışı ile yükselmiştir. B10 yakıt harmanına 50 ppm MWCNT ilavesinin silindir içi basınç artışını etkilemediği vurgulanmıştır. Hatta, B10 ve B20 yakıt

harmanlarında 50 ppm MWCNT mevcudiyetinde, silindir içi basıncın D100 ile benzer olduğu tespit edilmiştir. Maksimum basıncın en yüksek değerinin, B10 yakıt harmanına 150 ppm MWCNT ilavesi ile elde edildiği bildirilmiştir. Silindir içi en yüksek sıcaklık değerlerinin 50 ppm MWCNT dozajıyla gerçekleştiğini rapor edilmiştir. Çalışmanın sonucunda, yakıt harmanlarına MWCNT ilavesinin emisyon ve yanma karakteristikleri üzerine olumlu etkileri olduğu kurgulanmıştır.

Solmaz ve ark., (2023) tek silindirli direkt enjeksiyonlu bir dizel motorda, B20'ye MWCNT ilavesinin, performans, yanma ve emisyonlara etkilerini incelemişlerdir. Bu incelemede, B20'ye MWCNT ilavesinin D100'e kıyasla FTV'yi arttırdığı kaydedilmiştir. MWCNT katkılı yakıtların D100'den daha iyi performans sağladığı gözlemlenmiştir. B20'ye 100 ppm dozda MWCNT ilavesiyle, CO, HC ve kurum emisyonlarında önemli ölçüde azalma sağlanmıştır. MWCNT'nin yüksek yüzey alanı/hacim oranı ve ısı iletkenliği sayesinde yakıt atomizasyonunu iyileştirdiği, yanma verimini arttırdığı ve yanma süresini kısalttığına kanaat getirilmiştir. Bunun sonucu olarak, MWCNT katkılı yakıtların, tüm yük şartlarında NO_x emisyonunu arttırdığı tespit edilmiştir.

Yapılan birçok çalışmada, yakıta ilave edilen nanopartiküllerin yakıtın ısıl değeri, viskozitesi ve setan sayısı gibi fizyokimyasal özelliklerini nispeten iyileştirdiği bildirilmiştir (Selvan ve ark., 2014; Karthikeyan ve Prathima, 2016; Naik ve Kumar 2018; El-Seesy ve ark., 2019; Manigandan ve ark., 2020). Ancak, yüzey alanlarının geniş olması ve yüzey aktiviteleri sebebiyle kümelenme eğilimi göstermekte buna bağlı olarak da nanopartiküllerin kararlılıkları düşmektedir (Chen ve ark., 2018). Nanopartikülerin yakıt içerisindeki dispersiyon kalitesi ve süspansiyon kararlılığı, geniş bir yüzey alanı oluşturması yüzey hacim oranını ve termal iletkenliği arttığından, yakıtın buharlaşma hızını arttırmaktadır (Soudagar ve ark. 2018; Wang ve ark., 2020). Nanopartiküllerin yakıt içerisinde kararlı bir şekilde süspansiyon halinde kalmaları ve kısa sürede sedimentasyona uğramamaları için bazı yöntemler vardır. Bu yöntemler, yakıta yüzey aktif madde (sürfaktan) ilavesi ve ultrasonik karıştırma yöntemleridir (Fayaz ve ark., 2021).

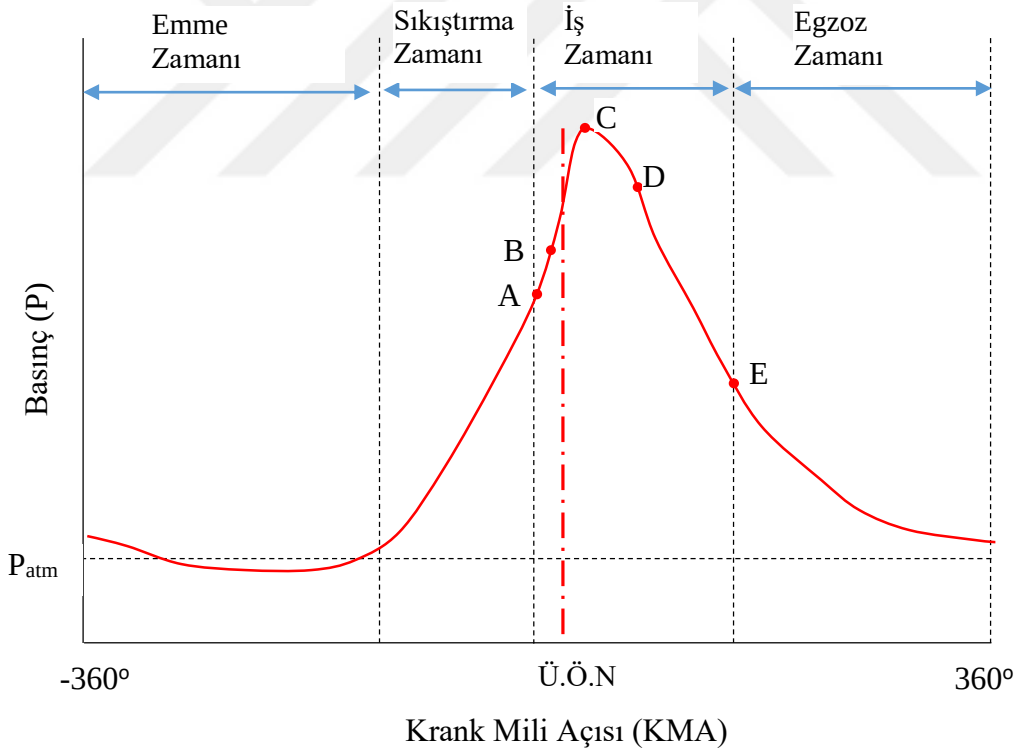
CNT'lerin kararlılığını temin etmek için yaklaşık %2 oranında span 80 ve twen 80 kullanılmaktadır (Gad ve Jayaraj, 2020; Gad ve ark., 2021) Sodyum dodesil sülfat da (SDS) evrensel olarak kabul gören ve önerilen sürfaktan maddelerdendir. (Wang ve ark.,

2020). Chauhan ve diğerleri, CNT katkısıyla meydana getirdikleri nanoakışkanın, SDS ile daha iyi bir kararlılık sağladığını bildirmişlerdir (Chauhan ve ark., 2016). Mujtaba ve diğerleri dimetil karbonat, dietil eter, biyodizel ve dizel yakıt karışımlarına nanopartikül ilave ederek, performans ve emisyonlar üzerine etiklerini incelemişlerdir. Karışım yakıt içerisindeki nanopartikül kararlılığını temin etmek için sürfaktan madde olarak SDS ilave etmişlerdir (Mujtaba ve ark., 2020). Fayaz ve diğerleri tek silindirli direkt enjeksiyonlu bir dizel motorda, biyodizel karışım yakıta farklı türde nanaopartikül ilave etmişlerdir. Nanopartikül kararlılığını sağlamak için ise SDS kullanılmıştır (Fayaz ve ark., 2021).

Literatür çalışmaları incelendiğinde biyodizel, n-oktanol ve MWCNT üçlü karışımları ile ilgili sınırlı sayıda deneysel çalışmanın olduğu görülmektedir. Ayrıca, yapılan deneysel çalışmaların büyük bir kısmında mekanik püskürtme sistemine sahip dizel motorlar kullanılmıştır. Günümüzde CRDI sistemine sahip motorlarda elektronik yakıt enjeksiyon sistemleri kullanılmaktadır. CRDI sistemi, yüksek enjeksiyon basınçlarının kullanılmasına izin verir. Yakıt enjeksiyon zamanlamalarının motor yüküne ve devrine bağlı olarak esnek ve hassas bir şekilde kontrolünü sağlamaktadır. Mekanik püskürtme sistemlerine kıyasla, CRDI sistemi ile motor performansı, egzoz emisyonları ve yanma karakteristikleri iyileştirilmektedir. Bu nedenle, günümüz dizel motorlarının, yakıt tüketim değerlerini düşürmek ve motor performansını artırmak için CRDI enjeksiyon sistemi ile donatılmaktadır. Bu çalışmada, ısıl değeri ve yoğunluğu dizel yakıtına yakın olan n-oktanol biyodizel karışımına MWCNT ilavesinin CRDI bir dizel motorun performansı, egzoz emisyonları ve yanma karakteristiklerinde iyileşme sağlayacağı öngörülmektedir. Mekanik püskürtme sistemine sahip dizel motorlara kıyasla daha yüksek enjeksiyon basınçlarına ulaşabilen CRDI dizel motorlarında n-oktanol/MWCNT ilavesinin etkisinin belirlenmesi, bu çalışmayı diğerlerinden ayıran özellik olarak öne çıkarmaktadır. Çalışmada kullanılan bir diğer nanopartikül B_2O_3'tür. B_2O_3 nanopartikülleri ile ilgili sınırlı sayıda çalışmaya rastlanmıştır. Literatür incelendiğinde, genellikle bor nanopartiküllerinin yanma davranışları ve yakıt katkı maddesi olarak kullanımının dizel motor performansına etkileri incelenmiştir (Gan ve ark., 2012; Mehta ve ark., 2014; Kül ve Akansu, 2022). Ayrıca, biyodizel-n-oktanol yakıt karışımına B_2O_3 nanopartikül ilavesi ile ilgili herhangi bir çalışmaya rastlanmamıştır. Yapılan çalışma ile literatürdeki bu eksikliğin giderilmesine katkı sağlanacağı düşünülmektedir.

3. DİZEL MOTORLARDA YANMA

Dizel motorlarda silindir içerisine alınan hava, sıkıştırılarak basınç ve sıcaklığı yükseltilir. Sıcaklığı ve basıncı arttırılan havanın üzerine, enjektörden yüksek basınçla yakıt püskürtülür. Yanma işlemi, püskürtülen yakıtın kendiliğinden alev almasıyla başlar. Dolayısıyla iş zamanı, yakıtın alev almasıyla başlar, egzoz supabının açılma zamanına kadar devam eder. Yanma işleminin devam ettiği krank açılarının belirli aralıklarında farklı yanma evreleri meydana gelmektedir. Yakıtın püskürtülmesiyle alevin ilk görülmeye başlaması arasında bir süreç vardır. Ardından, alevlenen yakıtın silindir içerisinde hızlı bir basınç artışı meydana getirdiği safha vardır. Bu safhanın akabinde kontrollü yanma işlemi ve bu safhayı da takip eden art yanma işlemi ile süreç son bulmaktadır (Erdoğan, 2019; Mert, 2020). Şekil 3.1'de dizel motorlarda krank mili açısına bağlı olarak yanma sürecinin safhaları gösterilmiştir.



Şekil 3.1. Dizel motorlarda yanma safhaları

3.1. Tutuşma Gecikmesi

Silindir içerisine yakıtın püskürtülmesiyle ilk alevin oluşması arasında belirli bir süre geçmektedir. Bu zaman aralığında yakıt daha küçük damlacıklara ayrılmakta, çevresinden ısı alarak buharlaşmakta, hava ile homojen bir karışım oluşmakta ve kimyasal olarak ön reaksiyonlar meydana gelmektedir. Bu süreç TG safhası olarak adlandırılmaktadır (Kaya, 2019). TG, fiziksel TG (küçük zerrelere ayrılma ve buharlaşma) ve ardından kimyasal TG (ön reaksiyonlar) olmak üzere iki safhadan meydana gelmektedir. Yanma olayının incelenmesinde ve egzoz emisyonlarının oluşumunda, TG önemli bir evredir. Şekil 3.1'de dizel motorlarda, 720º krank mili açısına göre zamanlar ve yanma safhalarının aralıkları gösterilmiştir. İş zamanı sırasında, yanmanın dört safhası A noktasından E noktasına kadar belirlenmiştir. A-B noktaları arasında TG safhası yer almaktadır. A noktasında yakıt enjektörden püskürtülmekte ve B noktasında ilk alev görülmeye başlamaktadır. Dizel motorlarda TG süresinin kısa olması istenmektedir. Yakıt, silindir içerisine A-D noktaları arasında püskürtülmektedir. TG süresinin uzun olması, püskürtmenin de devam etmesi nedeniyle silindir içerisinde yanmamış yakıt miktarını arttırmaktadır. Silindir içerisinde biriken bu yakıtın hızlı bir şekilde yanmasıyla ani basınç artışı meydana gelmekte ve bunun sonucu olarak motor vuruntusu oluşmaktadır. TG süresi birçok faktöre bağlı olmakla birlikte, yakıt kalitesi, yakıtın setan sayısı, silindir içi basınç ve sıcaklık önde gelen sebepler arasında yer almaktadır. Setan sayısı, silindir içi basınç ve sıcaklığın artışı, TG süresini kısaltmaktadır (Sarıkoç, 2019). Bu deneysel çalışmada kullanılan test motoru CRDI ve pilot enjeksiyon sistemine sahiptir. Ancak, pilot enjeksiyonun yüzdesi çok düşük olduğu için ana enjeksiyon esas alınmıştır.

3.2. Kontrolsüz (Ani) Yanma

TG periyodundan hemen sonra kontrolsüz yanma safhası başlar. Hızlı ya da ön karışımlı yanma safhası olarak da adlandırılmaktadır. Şekil 3.1'de B-C noktaları arasındaki süreci kapsamaktadır. B, alevin ilk görülmeye başladığı, başka bir deyişle yanma olayının başladığı noktadır. Kontrolsüz yanma safhasında silindir içerisindeki tüm bölgelerde homojen bir karışım olması beklenmez. Ancak, yanma için yeterli şartların oluştuğu bölgeler vardır. Yanmanın ilk aşaması bu bölgelerde meydana gelmektedir. Aslında,

silindirin farklı bölgelerinde yanma için gerekli şartları sağlayan yerlerde de oluşmaktadır. Bu aralıkta yanma işlemi hızlı bir şekilde gerçekleştiği için ısı yayma oranı da yükselmektedir. TG süresinin uzun olması, silindir içerisinde yanmamış yakıt miktarını arttırdığından dolayı, biriken bu yakıtın ani yanması ısı yayılım oranını da çok fazla arttırmaktadır. Yanma işleminin bu safhası TG süresine oranla kısa olduğundan, yakıtın büyük bir kısmı TG safhasında püskürtülmektedir. Bu nedenle, pik basıncı tayin eden TG'dir. Bu aşamada, silindir içi basınç artış hızı çok yüksek değerlere ulaşarak vuruntu meydana getirmektedir (Çelik, 2015).

3.3. Kontrollü Yanma

Difüzyon yanma olarak da adlandırılan bu safha, Şekil 3.1'de C-D noktaları arasındaki süreci kapsamaktadır. Kontrolsüz yanmanın hemen ardından başlamaktadır. TG safhasında oluşan homojen karışım, kontrolsüz yanma safhasında tükenmektedir. Difüzyon yanma aşamasındaki yanma hızı ise, bu safhadaki yakıt buharı ile havanın homojen karışımıyla ve karışım oluşum hızıyla belirlenmektedir. Yakıtın ortalama damlacık çapı, silindir içi türbülans ve hava fazlalık katsayısının bölgesel olarak 1'den büyük değere sahip olması, bu aşama için önem arz etmektedir. Sıvı haldeki yakıtın atomize olması, buharlaşması ve alev öncesi kimyasal reaksiyonlar, ısı dağılımını etkilemektedir. Kontrolsüz yanma safhasında maksimuma ulaşan ısı dağılımı, bu safhada ikinci bir pik değerine ulaşır, ancak daha düşüktür (Uyaroğlu, 2015). Kontrollü yanma fazının ilerlemesiyle ısı dağılımı da azalmaya başlamaktadır. Yanma işleminin üst ölü noktaya (ÜÖN) yakın olması performansı arttırmakta, is emisyonlarını da azaltmaktadır. Bu safhada buharlaşma ve karışım oluşumu istenilen düzeyde olmadığında, yanma olayı genişleme işleminin ileri aşamalarında tamamlanmış olacaktır. Pistonun alt ölü noktaya (AÖN) hareketi ile silindir içi sıcaklıkları da düşmeye başlamaktadır. Dolayısıyla, yakıtın tümünün yanmama ihtimali artmaktadır. Bunun sonucu olarak yanmamış karbon partikülleri meydana geldiğinden motor verimindeki kayıp artmaktadır (Borat ve ark., 1992; Çelik, 2015).

3.4. Art Yanma

Son yanma olarak da adlandırılan bu aşama, kontrollü yanma safhasının hemen ardından başlamaktadır. Şekil 3.1'de D-E noktaları arasında kalan bölgedir. E noktası hem art

yanmanın sonu, hem de egzoz supabının açıldığı yerdir. Piston AÖN'ya doğru ilerlediğinden hacim daha hızlı büyümektedir. Bu nedenle, basınç ve sıcaklık azalmaktadır. Bu safhada silindir içerisinde yanmış gaz konsantrasyonu fazladır. Bir önceki safhadan kalan yanmamış yakıt ve eksik yanma ürünleri bulunabilmektedir. Art yanma safhasında reaksiyona giren bu ürünler, genişleme sürecinde olsa bile düşük oranda ısı dağılımı gerçekleşmektedir. Art yanma safhasının uzun olması, silindir hacmi içerisindeki yüzeylerde yüksek ısı oluşturmaktadır. Aynı zamanda, segman oyuklarında karbon birikintisine ve yapışkan kalıntılar meydana getirmektedir (Heywood, 1988; Mert, 2020).

4. DİZEL MOTORLARDA KİRLETİCİ EMİSYONLAR

Dizel motorlarda tam yanma reaksiyonu sonucunda ürünler arasında CO_2, su (H_2O), moleküler azot (N_2) ve oksijen gazı (O_2) bulunmaktadır. Aslında, yanma olayı sırasında yakıtın tümü tam olarak yanmaz. Yanma olayını etkileyen çeşitli faktörler vardır. Silindir içerisindeki homojen hava yakıt karışımı, yakıtın buharlaşma kabiliyeti, silindir içerisindeki sıcaklığın homojen dağılımı, soğutma nedeniyle silindir cidar sıcaklığının düşüklüğü, yakıtın fiziksel ve kimyasal özellikleri ile motorun işletme parametreleri yanmayı etkilediğinden emisyonları da etkilenmektedir (Doğan, 2012). Neticede, çok sayıda parametre yanmayı ve akabinde egzoz emisyonlarını etkilemektedir. Bu şartlar altında gerçekleşen yanma reaksiyonunda, tam yanma ürünlerinin yanında eksik yanma ürünleri ve diğer elementlerin oksitleri meydana gelmektedir. Eksik yanma ürünleri arasında CO, HC ve partikül madde (PM) yer almaktadır. Silindire alınan hava içerisinde yaklaşık olarak %79 azot gazı bulunmaktadır. Yanma sonunda azotun bir kısmı azot oksitlere, NO ve azot dioksit (NO_2) olarak çevreye salınmaktadır (Özgür, 2015).

4.1. CO Emisyonları

CO rengi, tadı ve kokusu olmayan egzoz gazı içerisinde bulunan zehirli bir gazdır (Zare ve ark., 2021). Çevre havada yüksek konsantrasyonlarda bulunması zehirlenmelere yol açmaktadır. Solunum sistemiyle akciğer alveollerine alınan CO, oksijenden daha aktif bir şekilde kandaki hemoglobine geçerek hücrelere oksijen taşınmasını engellemektedir (Sayın ve ark., 2020).

CO gazı eksik yanma ürünüdür. Silindir içerisinde yeterli hava olmayışı, hava yakıt karışımının homojen olmaması ve homojenliği etkileyen türbülans gibi faktörler, CO emisyonlarının oluşumu üzerinde etkilidir (Gurusala ve ark., 2015; Razek ve ark., 2017; Venu ve Appavu, 2019). Yakıtın tam reaksiyona girmesi için gerekli oksijenin bulunmaması durumunda, yakıt bünyesinde bulunan karbon atomları, CO_2 oluşturacak kadar oksijen ile buluşamadığından dolayı, CO olarak kalmaktadır. Dolayısıyla, karbon tam olarak reaksiyona girmediğinden eksik yanma ürünü olarak değerlendirilmektedir. Bu durum, yakıtın enerjisinin tam olarak kullanılmaması anlamına geldiğinden, yanma reaksiyon verimi de düşük olmaktadır (Sayın ve ark., 2020). Dizel motorlar fazla hava ile çalıştıklarından dolayı, benzinli motorlara göre düşük CO emisyonları

oluşturmaktadırlar. Ancak, silindir içerisinde fazla hava olsa da, kimyasal kinetiklerden ve yakıtın türüyle de ilgili olmakla beraber kötü atomizasyon, damlacık boyutlarını büyüttüğünden dolayı, bir miktar CO meydana gelmektedir (Gurusala ve ark., 2015).

4.2. HC Emisyonları

HC emisyonları, karbon ve hidrojenin farklı tür bileşiklerinin olduğu kirleticilerdir. Havada buhar fazında, asılı halde ve NO_x ile tepkimeye girerek sis oluşturmaktadırlar. Canlılar tarafından solunduğunda ciddi sağlık sorunları oluşturmaktadır (Sayın ve ark., 2020).

HC, yakıtın tam yakılmaması, başka bir deyişle kısmen ayrışmış yakıt molekülleri veya yanma olayına iştirak etmemesi sonucunda meydana gelen eksik yanma ürünleridir (Sayın ve ark., 2020). Silindir içi sıcaklıkların düşük olması ve oksijen miktarının yetersiz olması, yanma odasındaki boşluklar, yağ filmi ve birikintiler HC oluşumunun temel sebeplerindendir (Erdoğan, 2019; Safa, 2006). İş zamanının sonuna doğru fakir karışımlı hacimlerde yanma reaksiyonları daha yavaş gerçekleşmektedir. Aynı zamanda, püskürtme sonuna doğru enjektör iğnesinin uç bölgesinde bulunan boşluktaki yakıtın, genişleme zamanı sonuna doğru oksijenin yetersiz olmasından dolayı HC artmaktadır (Uyaroğlu, 2015). Alev yayılımının olmadığı bu bölgelerde eksik yanma reaksiyonları gerçekleşebilmektedir. Karışımın daha zengin olduğu durumlarda, silindir cidarlarının soğuk olması nedeniyle tam yanma reaksiyonları gerçekleşmemekte ve HC emisyonları meydana gelmektedir.

4.3. NO_x Emisyonları

İçten yanmalı motorlarda yanma için gerekli olan havada yaklaşık %79 oranında azot gazı bulunmaktadır. Yanma işleminde azot, oksijen ile reaksiyona girerek azot oksit bileşikleri oluşturmaktadır. Nitröz oksit (N_2O), diazot trioksit (N_2O_3), azot pentaoksit (N_2O_5), NO ve NO_2 gibi azot bileşiklerinin tümü NO_x olarak adlandırılmaktadır (Dönmez, 2019). Motorlu araçlardan salınan NO_x emisyonlarından olan NO_2, havada su ile birleşerek nitrik asit (HNO_3) oluşturmakta, bunun sonucunda asit yağmurlarına neden olarak, çevre ve canlılar üzerinde olumsuz etkiler yaratmaktadır. Ayrıca NO_2 emisyonları, yer seviyelerinde ozon oluşumuna katkıda bulunarak fotokimyasal sis meydana getirmektedirler (Safa, 2006; Uyaroğlu, 2015). Bunun yanı sıra, solunan hava içerisinde

bulunan NO_x'ler solunum yoluyla akciğerlere ulaşmakta ve burada nem ile birleşerek HNO_3 oluşturmaktadır. Çevre havada konsantrasyonu az olsa da, akciğerlerde birikerek ciddi rahatsızlıklara yol açabilmektedir.

Egzoz emisyonları içerisinde daha çok NO, ve NO_2 bulunmaktadır (Appavu ve ark., 2019). Bu bileşikler arasında da NO en yüksek seviyede ve yaklaşık NO_x'lerin %85 ile %95 kadarını meydana getirmektedir (Reşitoğlu, 2016). Ancak, NO emisyonları, yanma reaksiyonu sonrasında dönüşüme uğrayarak NO_2 oluşturabilmektedir (Zare ve ark., 2021).

Dizel motorlarda NO_x emisyonların meydana gelmesinde temelde beş farklı oluşum mekanizması etkilidir. Bunlar, Zeldovich, Fenimore ve yakıt kaynaklı NO'dur. NO_x oluşumunda diğer mekanizmalar arasında NNH ve genişletilmiş Zeldovich mekanizmaları da bulunmaktadır (Klippenstein ve ark., 2011; Semakula ve Inambao, 2018). Zeldovich oluşum mekanizmasında NO_x oluşumunun temel nedeni, atmosferik hava içerisindeki moleküler haldeki azotun, yüksek sıcaklıklarda oksijen moleküllerinin oksijen atomuna ayrışmasıyla gerçekleşen oksidasyondur. N_2'nin NO'ya dönüşümü aşağıdaki denklemlerde verilmiştir (Karahan, 2011).

$$O + N_2 \rightarrow NO + N \quad (4.1)$$

$$N + O_2 \rightarrow NO + O \quad (4.2)$$

$$N + OH \rightarrow NO + H \quad (4.3)$$

Fenimore NO oluşum mekanizmasına ani NO oluşum mekanizması da denilmektedir. Özellikle, zengin karışım bölgelerinde görülmektedir. HC'de bulunan karbon ve hidrojen radikallerinin, moleküler azot ile yanma reaksiyonunda siyanür (CN) ve hidrojen siyanür (HCN) meydana gelmektedir. Oluşan bu radikaller oksijen ve/veya hidroksiller ile tepkimeye girerek NO_x oluşmaktadır (Karahan, 2011; Semakula ve Inambao, 2018).

$$CH + N_2 \leftrightarrow HCN + N \quad (4.4)$$

$$C + N_2 \leftrightarrow CN + N \quad (4.5)$$

$$N + O_2 \leftrightarrow NO + O \quad (4.6)$$

$$HCN + OH \leftrightarrow CN + H_2O \quad (4.7)$$

$$CN + O_2 \leftrightarrow NO + CO \quad (4.8)$$

Yakıt kaynaklı NO oluşumu, yakıtın bünyesinde bulunan azot bileşiklerinin oksitlenmesiyle meydana gelmektedir. Bu reaksiyonda çoğunlukla moleküler azot açığa çıkmaktadır. Yalnızca az miktarda azot oksitlenerek NO oluşmaktadır (Karahan, 2011; Semakula ve Inambao, 2018; Yüksek, 2013).

Araştırmalara göre silindir içi sıcaklıkların ve oksijen yüzdesinin yüksek olması, NO_x emisyonlarını arttıran temel iki faktör arasında yer almaktadır. NO_x emisyonları, motorun enjeksiyon stratejisi, yakıtın ısıl değeri, yanma süresi, TG süresi gibi parametrelerden etkilenmektedir (Varatharajan ve Cheralathan, 2012). Birçok araştırmada dizel motorlarda kullanılan biyodizel, bünyesinde oksijen bulundurduğundan dolayı yüksek NO_x emisyonu meydana geldiği bildirilmiştir (Abed ve ark., 2018; Amiri ve Shirneshan, 2020; Appavu ve ark., 2019; Elkelawy ve ark., 2019; Mikulski ve ark., 2016; Yoon ve ark., 2019). Bazı araştırmalara göre ise biyodizel yakıtların ısıl değerinin dizel yakıta göre düşük olması sebebiyle, NO_x emisyonlarında düşüşlerin olduğunu bildirmişlerdir (How ve ark., 2018). Biyodizel yakıtlara alkol ilavesinin oksijen yüzdesini arttırmasıyla belirli yüklerde NO_x emisyonlarının artışına neden olduğu bildirilmiştir. Birçok araştırmacı alkol yakıtların yüksek gizli buharlaşma ısıları nedeniyle yanma sıcaklığını düşürdüğü için, NO_x emisyonlarında azalma meydana geldiğini ifade etmişlerdir (Datta ve Mandal, 2017; Yılmaz ve Sanchez, 2012).

4.4. CO_2 Emisyonları

Sera gazları içerisinde önemli bir bileşene sahip olan CO_2 emisyonları, küresel ısınma ve iklim değişikliğinin dikkat çeken sebeplerindendir. Sanayi devrimi öncesinden bu zamana kadar yaklaşık %40 arttığı bildirilmektedir. Günden güne artan araç sayısıyla birlikte taşıt kaynaklı CO_2 emisyonları büyük bir paya sahiptir. CO_2, güneşten gelen ısıyı absorbe ettiğinden dolayı, dünya sıcaklık ortalamasını arttırmaktadır. Bu etkilerin gelecekte de devam etmesi öngörülmektedir (Balogh ve Jambor, 2018).

Bir hidrokarbonun yanma reaksiyonunun tam olması sonucunda CO_2 ve H_2O meydana gelmektedir. Belirli bir miktar yakıtın yanma sonu ürünleri arasında CO_2 yüzdesinin

yüksek olması, yakıtın verimli bir şekilde reaksiyona girdiğinin göstergesidir (Karthikeyan ve Prabhakaran, 2018; Venu ve Appavu, 2019). Motor yükü ve hızının artışı, silindir içerisine püskürtülen yakıt miktarını arttırdığından, CO_2 emisyonları da bu artışlarla birlikte yükselmektedir. Ayrıca, CO_2 ve CO emisyonları arasında negatif korelasyon ilişkisi vardır (Rangabashiam ve ark., 2020; Vellaiyan ve Partheeban, 2020).

4.5. İs Emisyonları

Duman veya is olarak da tanımlanan partiküller motorun egzozundan atılan katı parçacıklardır. Tamamlanmamış yanma süreçlerinin ürünü olan is, oksijenin yetersiz olduğu ortamda yakıt molekülündeki hidrojenin oksitlenerek karbon atomlarının oksijen bulamayarak katı karbon tanecikleri halinde egzozdan çevreye salınmaktadır. Yakıt türüne bağlı olarak is emisyonu oluşumu farklılık göstermektedir. Ancak, is emisyonunun temel deni, hava-yakıt karışımının yetersiz olması, yakıtın buharlaşma kabiliyeti, yerel zengin karışım bölgelerinin bulunması ve zamana bağlı enjeksiyon enjeksiyonun değişmesidir. İs, katı parçacıklar olduğundan, segman yuvalarının dolmasına ve silindirlerin aşınmasına sebep olmaktadır (Sayın ve ark., 2021; Karaca, 2021).

5. DİZEL MOTORLARDA KULLANILAN ALTERNATİF YAKITLAR, YAKIT KATKI MADDELERİ VE YAKIT ÖZELLİKLERİ

Birçok sektörde yaygın şekilde kullanılan dizel motorlar, petrol ürünü olan motorin ile çalıştırılmaktadır. Ancak, petrolün sınırlı rezerve sahip olması, tükeneceği endişesi, istikrarsız yakıt fiyatları ve sıkı emisyon standartları gibi çeşitli nedenlerden dolayı alternatif yakıtlara ilgi artmaktadır (Wu ve ark., 2017; Sayın ve ark., 2013). Dizel motorlarda kullanım uygunluğu olan alternatif yakıtların depo edilmesi, taşınması ve ulaşılabilirliğinin kolay olması önem arz etmektedir (Bhatia ve ark., 2021). Biyodizel, fiziksel ve kimyasal özellikleri bakımından dizel yakıtına benzerlik gösterdiğinden, dizel motorlar için ön planda olan alternatif yakıttır. Bunun yanı sıra çeşitli alkoller, doğal gaz, dizel ve biyodizel ile karışım halinde kullanılabilen, hala üzerinde araştırmaların devam ettiği diğer alternatif yakıtlar da bulunmaktadır (Geng ve ark., 2017; Jiang ve ark., 2018; Sarıkoç, 2019).

5.1. Biyodizel Yakıtlar

Biyodizel, ayçiçeği, aspir, kolza ve soya gibi çeşitli türde yağlı tohumlardan elde edilen bitkisel yağlar ile atık durumdaki hayvansal ve bitkisel yağların çeşitli kimyasal reaksiyonları sonucunda, yakıt özelliklerinin dizel yakıtına yaklaştırılarak elde edildiği yenilenebilir alternatif bir dizel motor yakıtıdır (Alptekin ve ark., 2019; Chauhan ve ark., 2016; Uyaroğlu, 2015). Biyodizel, katalizör olarak potasyum hidroksit (KOH) veya sodyum hidroksit (NaOH) gibi katalizörler eşliğinde, kısa zincirli ve yapısında hidroksil (OH) barındıran alkoller (metil veya etil alkol) ile yaygın şekilde tercih edilen transesterifikasyon yöntemiyle üretilmektedir. Biyodizel üretiminde etil alkol kullanıldığında etil ester, metil alkol ile elde edildiğinde ise metil ester olarak adlandırılmaktadır (Mert, 2020; Sarıkoç, 2015; Uyaroğlu, 2015). Metanol, düşük maliyeti ve transeterifikasyon reaksiyonunda diğer alkollere göre daha iyi sonuç verdiğinden biyodizel üretimi için ön plandadır (Alptekin, 2013).

Biyodizel, dizel motorlarda genellikle herhangi bir modifikasyona ihtiyaç duyulmadan ya da küçük değişikliklerle saf veya dizel yakıtı ile belirli oranlarda karışım halinde kullanılabilmektedir. Biyodizel kütlesel olarak yapısında yaklaşık %10-12 dolaylarında oksijen içermektedir. Biyodizelin üretildiği hammaddenin türüne bağlı olarak ısıl değeri,

setan sayısı, yoğunluğu ve oksidasyon kararlılığı gibi çeşitli özellikleri farklılık göstermektedir (Karahan, 2011; Mert, 2020; Yang ve ark., 2021. Tablo 5.1'de çeşitli hammaddelerden elde edilen biyodizellerin yakıt özellikleri verilmiştir.

Tablo 5.1. Farklı tür hammaddelerden üretilen biyodizelin yakıt özellikleri

Biyodizel hammadesi	Isıl Değer (MJ/kg)	Kinematik Viskozite (cSt, 40 °C)	Yoğunluk (kg/m³)	Setan Sayısı	Parlama Noktası (°C)	Referanslar
Kanola yağı	39,000	4,40	884,40	54,30	177,6	(Efe ve ark., 2018)
Calophyllum inophyllum	38,90	5,76	872	58,70	179	(Kshirsagar ve Anand, 2017)
Atı balık yağı	41	4,142	870	51,50	164	(Fadhil ve Ahmed, 2016)
Pamuk çekirdeği yağı	41,680	6	850	50	-	(Nabi ve ark., 2009)
Ayçiçeği	39,83	4,47	884	-	-	(Dueso ve ark., 2018)
Fındık Yağı	40	4,54	861,9	52,2	168	(Efe ve ark., 2018)
Mısır	39,97	4,30	867,4	47,4	170	

Bu deneysel çalışmada kullanılan biyodizel DB Tarımsal Enerji Sanayi ve Ticaret A.Ş.'den temin edilmiştir. Bu firmadan alınan biyodizel, evsel kullanıma uygun olmayan ve atık evsel kızartma yağlarının karışımından oluşan yağlardan elde edilmiştir. Biyodizelin fiziksel ve kimyasal özellikleri, firma tarafından ITS Caleb Brett Deniz Survey A.Ş. İskenderun Laboratuvarı'ında yapılmaktadır. Laboratuvar analiz sonuçları Ek-1'de verilmiştir. Biyodizelin bazı özellikleri; setan numarası: 51,3, 40 °C'deki yoğunluğu 883,7 kg/m³ ve 40 °C'deki kinematik viskozitesi 4,37 mm²/s'dir. Biyodizelin özellikleri TS EN 14214 standartlarına uygundur.

5.2. Alkol Yakıtlar

Alkol yakıtlar, biyodizel gibi yenilenebilir oksijenli bir yakıt katkı maddesidir. Alkoller, saf halde veya dizel ve biyodizel yakıtlar ile karışım halinde kullanılabilmektedir. Aynı zamanda, yakıt özelliklerini de geliştirebilmektedir. Dizel motorlarda yakıt katkı maddesi olarak etanol, metanol, n-bütanol, propanol ve n-oktanol gibi alkoller kullanılabilmektedir. Çeşitli alkol türleri kullanılarak motor performansı ve emisyon testlerinin gerçekleştirildiği çalışmalar yapılmıştır (Joy ve ark., 2018: Mujtaba ve ark., 2021; Ning ve ark., 2020). Bazı alkol türlerinin dizel yakıt özelliklerine yakın olmaması, kullanımları sonucunda motor performansı ve emisyonlarını olumsuz yönde etkileyebilmektedir. Metanol düşük setan sayısına ve ısıl değere sahiptir. Ayrıca, gizli

buharlaşma ısısı daha yüksektir (Hasan ve ark., 2021). Bu özellikleri nedeniyle, fren motor gücü ve FTV azalırken, FÖET ve NO_x emisyonu artmaktadır. Bazı çalışmalarda yüksek gizli buharlaşma ısısının soğutma etkisinden dolayı NO_x'i düşürdüğü belirtilmektedir (Ashok ve ark., 2019). Benzer şekilde bütanol de düşük setan sayısına ısıl değere ve yüksek gizli buharlaşma ısısına sahiptir. Bu nedenle, D100'e kıyasla daha yüksek FÖET ve NO_x sergilerken, daha düşük FTV'ye sahiptir (Yan ve ark., 2021). Hekzanolün ısıl değeri dizel yakıtına daha yakındır. Bu nedenle diğer alkol yakıtlara kıyasla daha yüksek FTV'ye sahiptir. Ancak, viskozitesi dizel yakıtına göre daha yüksektir. Ayrıca, yüksek gizli buharlaşma ısısına sahiptir (Yan ve ark., 2021).

Hidroksil radikallerinin birincil karbona bağlı olduğu alkoller birincil alkol olarak tanımlanmaktadır. Bu gruba metanol, etanol ve bütanol dahildir (Ning ve ark. 2020). Biyokütle, doğal gaz ve kömürden türetilebildiği için büyük bir avantaja sahiptir. Bu yakıtlar, yüksek oktan sayısına sahip olması itibari ile buji ateşlemeli motorlarda kullanım kolaylığı sağlamaktadır. Ancak, setan sayıları düşüktür (Balki ve ark., 2016). Alkol yakıtların buharlaşma gizli ısılarının yüksek olması silindir içi sıcaklığını düşürmektedir. Bu sebeple, NO_x emisyolarını azaltmaktadır (Ashok ve ark., 2019). Yakıt bünyesinde oksijen bulunması PM emisyonlarını da iyileştirmektedir (Zhang ve ark., 2016). Tablo 5.2'de bazı alkol yakıtların yakıt özellikleri verilmiştir (Balki ve ark., 2016; Rajak ve ark., 2016; Sayın, 2010; Yılmaz, 2012; Zhang ve ark., 2016).

Tablo 5.2. Alkol yakıtların yakıt özellikleri

Özellikler	**Metanol**	**Etanol**	**n-bütanol**	**n-oktanol**
Yoğunluk (kg/m^3, 20 ºC)	792	790	810	830
Alt ısıl değer (MJ/kg)	20,100	26,900	34	39,55
Setan Sayısı	6	<5	25	37,5
Parlama noktası (ºC)	11	13	36	86

n-Oktanol, metanol ve etanol gibi hafif alkollere göre daha yüksek setan sayısına ve ısıl değere sahiptir. Ayrıca, buharlaşma gizli ısıları daha düşüktür. Bu sayede, soğukta çalıştırma problemlerini ortadan kaldırır. Bünyesinde %12 oranında oksijen barındırır ve böylece, yakıt ile havanın daha kolay buluşması sağlanmış olur. n-Oktanolun üstün özelliklerinden biri de dizel veya biyodizel yakıtları ile faz ayrılması olmadan iyi

karışabilme yeteneğidir. Böylece, dizel veya biyodizel ile daha homojen bir karışım oluşturur.

5.3. Yakıt Katkı Maddeleri

İçten yanmalı motorlarda kullanılan yakıtların fiziksel özelliklerinin iyileştirilmesi yanma sürecini etkilediğinden, motor karakteristiklerini de değiştirmektedir. Katkı maddeleri yakıtın viskozitesi, yoğunluğu, ısıl değeri, setan sayısı ve buharlaşma yetenekleri gibi çok sayıda özelliği etkilemektedir. Bu özelliklerin bir kısmı olumlu, bir kısmı da olumsuz yönde değişebilmektedir. Ancak, bir özelliğin değişmesi diğer özelliğin değişmesinden daha etkili olabilmektedir. Bu durumda, iyi yönde değişen özelliğin daha baskın olması yakıtın stabilitesini, kullanımını, ekonomisini, motor performansı, egzoz emisyonları ve yanma sürecini iyileştirebilmektedir (Khan ve ark., 2022). Dizel motorlarda kullanılan yakıtların dezavantajlı yönlerini bertaraf edebilmek için yakıt katkı maddeleri kullanılması uygun bir yöntem olarak görülmektedir (Kegl ve ark., 2021). Hidrojen, su, nanopartiküller ve dimetil eter gibi çeşitli türde yakıt katkı maddeleri üzerine deneysel çalışma yapılmıştır (Jin ve Wei, 2023). Son zamanlarda, birçok araştırmacı tarafından yakıt katkı maddesi olarak kullanılan nano malzemelerin (nanopartiküller) egzoz emisyonları ve motor performansında iyileşme sağladığı bildirilmiştir (Al-Dawody ve Edam, 2022; Ge ve ark., 2022; Hoang ve ark., 2022).

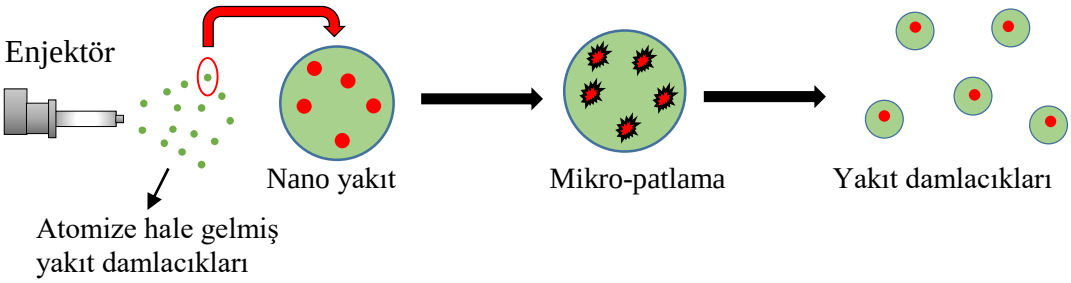
En az bir ayrıtı 100 nm'den küçük olan yakıt katkı maddesi nanopartikül olarak kabul edilmektedir (Khan ve ark., 2022). Boyutlarının küçük olması, yüksek yüzey alanı oluşturmaktadır. 1 ile 100 nm arasında farklı boyutlarda silindirik, küresel, düz, konik, boru şeklindedirler. Nanopartiküller yapılarını oluşturan temel kimyasal elementlere göre karbon bazlı, organik, inorganik ve kompozit bazlı olmak üzere çeşitli sınıflara ayrılmaktadırlar (Nanthagopal ve ark., 2020). Yakıta eklenen nanopartiküller kinematik viskozite, yanma noktası, parlama noktası ve akma noktası gibi yakıt özelliklerini etkilemektedir. Nanopartiküllerin sıvı tabakasının hareketine direnç göstermesi nedeniyle eklendikleri sıvının viskozitesini arttırmaktadır (Khan ve ark., 2022).

Yakıt katkı maddesi olarak Al_2O_3, bakır oksit (CuO), TiO_2, CNT, CeO_2, Mangan (Mn), Magnezyum (Mg), demir oksit (FeO_2) gibi çok sayıda nano malzemeler bulunmaktadır (Ahmed ve ark., 2020; Lee ve ark., 2021). Nanopartiküller, oksitleri ile birlikte Al_2O_3 gibi,

oksitleri olmadan Mg gibi ve çoklu nanopartikül CeO_2-CNT (Selvan ve ark., 2014) olduğu gibi deneysel çalışmalarda uygulamaları bulunmaktadır.

Nanopartiküllerin boyutları, türü ve yakıta eklenen dozaj miktarları silindir içerisindeki atomizasyonu etkilemektedir. Atomizasyon kalitesi de yakıtın buharlaşma davranışını değiştirmektedir (Küçükosman ve ark., 2022). Ayrıca, nanopartiküllerin yakıt içerisinde homojenliği, atomozisayonu etkileyen başka bir parametredir. Nanopartiküllerin yüzey alanlarının ve yüzey reaktivitelerinin yüksek oluşu, yakıt içerisinde kümelenme eğilimini arttırmakta ve yakıt içerisindeki reaktivitesini azaltmaktadır. Bu nedenle, yakıt içerisindeki dağılımı ve süspansiyonu için uygun bir sıvı (sürfaktan madde) kullanılarak ultarasonik bir karıştırıcı ile homojenliği ve kararlılığı sağlanmaktadır (Gao ve ark., 2019; Mujtaba ve ark., 2020). Nanopartiküllerin sıvı yakıt içerisindeki stabilitesiyle birlikte homojen bir şekilde dağılımı için fiziksel ve kimyasal yöntemler uygulanmaktadır. Nanopartiküllerin sıvı yakıt içerisinde homojen dağılımını sağlamak için ultrasonik veya manyetik karıştırma teknikleri uygulanmaktadır. Ultrasonik karıştırma, banyolu veya daldırma çubuğu ile yapılabilmektedir. Yakıt içerisinde homojen bir dağılım sağlanabilmesi için optimum bir süre ve frekans değerinde uygulanması gerekmektedir (Hoang ve ark., 2022). Kimyasal yöntemde sıvı yakıtın pH değeri değiştirilerek, nanopartiküllerin dağılımı iyileştirebilmektedir. Sürfaktan maddeler yardımıyla yakıtın pH değerini değiştirilebilmektedir. Oleik asit ve SDS, nanopartikül stabilitesinde olumlu etki yaptığı ve seçenekler arasında en iyi sürfaktan maddeler olduğu bildirilmiştir. Ayrıca, sürfaktan maddelerin yakıt damlacıkları üzerinde her hangi bir olumsuz etkisi olmadığı belirtilmiştir (Hoang ve ark., 2022).

Nano yakıt bünyesinde bulunan nanopartiküllerin yüksek termal iletkenlikleri sayesinde, silindir içerisine püskürtülen yakıtta mikro patlama fenomenleri oluşturarak ikincil bir atomizasyon yaratmaktadır. Böylece, yakıt daha küçük zerreler halinde daha hızlı buharlaştığından hava yakıt karışımını olumlu yönde etkilemektedir. Şekil 5.1'de püskürtülen yakıtın silindir içerisindeki ikincil atomizasyonu şematik olarak verilmiştir.

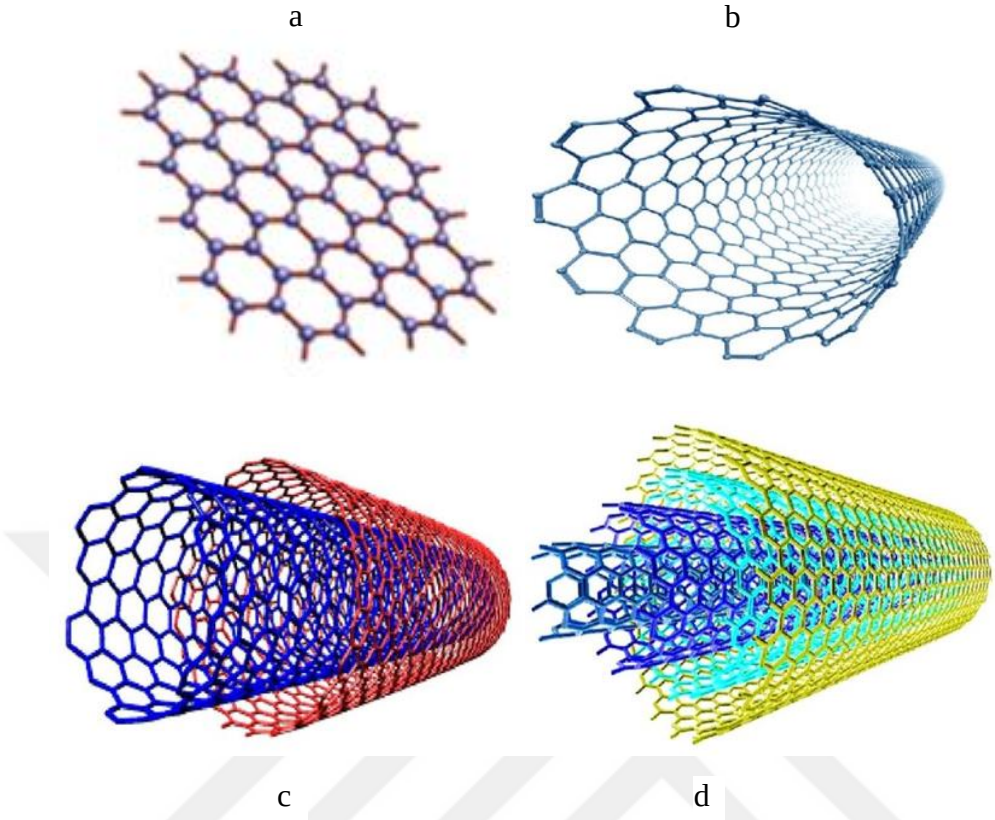


Şekil 5.1. Nano yakıtın ikincil atomizasyonu

Püskürtme sonundaki yakıt damlacıklarının daha küçük yakıt damlacıklarına ayrılması yöntemi mikro patlama ve ikinci atomizasyon olarak bilinir (Soudagar ve ark., 2018). Şekil 5.1'de püskürtülen yakıt damlacıklarında bulunan nanopartiküller, yüksek yüzey alanları ve yüksek termal iletkenlikleri sayesinde ısı çekerler. Nanopartiküller temas halinde oldukları yakıt damlacığında mikro patlama meydana getirirler. Yakıt damlacığı daha küçük yakıt damlacıklarına ayrılarak yakıtın daha hızlı buharlaşmasına ve hava ile daha iyi bir karışım oluşturmasına yardımcı olur. Ayrıca, zengin yakıt bölgelerinin de hava ile temasını sağladığından karışım homojenliği üzerinde pozitif etki yaratmaktadır.

Yakıt katkı maddesi olarak en dikkat çekici nanopartiküller arasında karbon esaslı olan CNT'ler bulunmaktadır. CNT'ler, iki boyutlu düzlemsel bir yüzeye sahip olan ve altıgen kafes yapıdaki grafen nanopartiküllerin silindirik şekline denilmektedir CNT'ler yüksek üstün termal ve kimyasal özellikler sergilemektedirler. CNT'ler eklendikleri akışkanda katalizör görevi görerek, yakıtın yanma hızını ve setan sayısını iyileştirir. İyi termal iletkenlikleri sayesinde nanoakışkanın termal özelliklerini geliştirirler (Ealias ve Saravanakumar, 2017; Nanthagopal ve ark., 2020).

CNT'ler yapısal olarak farklı türlere sahiptir. Tek duvarlı karbon nanotüp (SWCNT), çift duvarlı karbon nanotüp (DWCNT) ve MWCNT gibi farklı duvar sayısına ve duvar yapısına sahiptir. SWCNT, tek bir grafit nanopartikülünün tüp (boru) halindeki silindirik şekilleridir. DWCNT, eş merkezli farklı çaplara sahip iki SWCNT'den oluşur. MWCNT ise, çok sayıda iç içe geçmiş SWCNT katmanlarından oluşmaktadır (Rafique ve ark., 2015). Şekil 5.2'de MWCNT ve MWCNT'yi meydana getiren nanopartiküllerin yapısı gösterilmiştir.

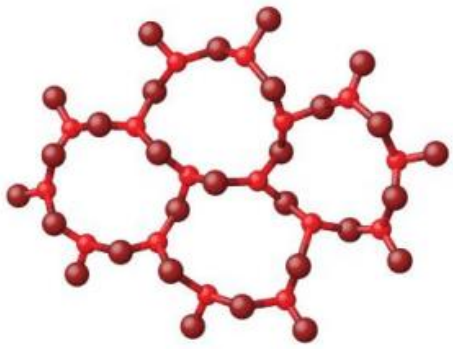


Şekil 5.2. Grafen, SWCNT, DWCNT ve MWCNT'nin yapısal görünümü

Yukarıda grafenin yapısı (a) (Shau ve ark., 2021), SWCNT'nin yapısı (b), DWCNT'nin yapısı ve MWCNT'nin yapısı (d) (Ferrier ve Honeychurch, 2021) ile gösterilmiştir. MWCNT'ler, yüksek, yüzey alanı hacim oranına, kimyasal kararlılığa ve yüksek termal iletkenliğe sahiptir. Metal esaslı nanopartiküller ile kıyaslandığında daha üstün kimyasal ve termal özelliklere haizdirler. MWCNT'lerin yüksek termal özellikleri sayesinde, eklendikleri sıvının termal iletkenliğini arttırmaktadır. Yüksek boy-en oranına sahip olmaları, yüksek difüzyonlu ısı iletkenliği göstermektedir ve bu davranış, eklendikleri sıvının artan ısıl iletkenliği için baskın bir faktördür. Bu sayede, ikinicil atomizasyon (mikro patlama) oluşturarak buharlaşma oranını hızlandırmakta, TG süresini kısaltmakta ve yanma sürecini iyileştirmektedir (Atelge ve ark., 2022; Gad ve ark., 2023).

B_2O_3,beyaz renkte, camsı veya kristal bir yapıya sahiptir. Genellikle borik asidin dehidrasyonu yöntemiyle üretilmektedir. Çeşitli bor bileşikleri arasında ticari açıdan en önemli olanı B_2O_3'tür. Bu tez çalışmasında kullanılan B_2O_3 nanopartiküllerinin yoğunluğu, 2,46 g/cm^3, erime noktası sıcaklığı 510 ^oC, kaynama noktası sıcaklığı ise 1860

^{o}C'dir. Şekil 5.3'te kristal yapıdaki B_2O_3 nanopartikülünün yapısı gösterilmiştir (Çakmak, 2021; Kangallı, 2022).



Şekil 5.3. Kristal yapıda bulunan B_2O_3 (Kangallı, 2022)

5.4. Yakıtların Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri

İçten yanmalı motorların türüne göre farklı yakıtlar kullanılmaktadır. Dizel motorlarda motorin ve motorine alternatif olan biyodizel ve alkol gibi çeşitli yakıtlar kullanılmaktadır. Bu yakıtların dizel motorlarda kullanılabilmesi için bazı fiziksel ve kimyasal özellikleri taşıması gerekmektedir. Bu bölümde, yoğunluk, viskozite, setan sayısı, ısıl değer, uçuculuk, parlama noktası ve tutuşma noktası özelliklerinden bahsedilmiştir.

5.4.1. Yoğunluk

Yoğunluk bir cismin birim hacminin kütlesi olarak tarif edilir. Dolayısıyla, birim hacimdeki yakıt kütlesi, yakıtın enerji yoğunluğunun bir ölçüsüdür. Yakıt yoğunluğu, setan sayısı ve ısıl değer ile ilişkilidir. Bu nedenle, motor performansı ve emisyonlarını doğrudan etkilemektedir (Alptekin ve Çanakcı, 2008). Farklı yoğunluğa sahip yakıtlar, belirli bir gaz kolu pozisyonunda silindir içerisine hacimsel olarak aynı miktarda püskürtülür. Ancak, kütlesel olarak farklı miktarlarda püskürtülür. Yakıtın yoğunluğu yüksek ise enjektörden kütlesel olarak daha fazla miktarda yakıt gönderilir. Bu durumda, yoğunluğu yüksek olan yakıtın kütlesel olarak fazla olması motor performansını ve emisyonları etkilemektedir (Karahan, 2011; Sarıkoç, 2019). Bu nedenle, yakıtların yoğunluğu motor performansı ve emisyonları açısından önem arz eden bir özelliktir. Biyodizelin yoğunluğu saf dizel yakıtının yoğunluğundan daha yüksektir. Deneysel

çalışmada karışım yakıt olarak biyodizel ve n-oktanol kullanılmıştır. n-Oktanolün yoğunluğu dizel yakıtı ile yaklaşık aynı değerlerdedir. Bu nedenle, biyodizel'e n-oktanol ilavesi, karışım yakıtın yoğunluğunu azaltmaktadır (Ashok ve ark., 2019). Yapılan bir çok çalışmaya göre, yakıtlara MWCNT ilavesinin yakıtın yoğunluğunu arttırdığı bildirilmiştir (Heydari-Maleney ve ark., 2017; Tomar ve Kumar, 2020; Sateesh ve ark., 2023). Literatürde B_2O_3 ile ilgili sınırlı sayıda çalışma bulunmaktadır. Yapılan bir çalışmaya göre B20 yakıt karışımına 100 ppm B_2O_3 ilavesinin yoğunluğu bir miktar düşürdüğü belirtilmiştir (Çakmak, 2021).

5.4.2. Viskozite

Viskozite ya da akmazlık, akışkanların iç sürtünmelerinin bir ölçüsüdür. Akmaya karşı gösterdikleri dirençtir. Motor performansı ve emisyonları açısından önemli bir parametredir. Bu nedenle, yakıt atomizasyonu ve buharlaşmasında belirleyici rol oynamaktadır. Bir yakıt için viskozitenin optimum değerlerden farklı oluşu, yakıtın küçük zerrelere ayrılmasını etkilemektedir. Silindir içerisinde yakıt ve havanın homojen bir karışım teşkili oluşturması istenmektedir. Dolayısıyla, yakıtın iyi bir şekilde pülverize olması, yakıtın buharlaşarak homojen bir karışım oluşturmasına yardımcı olmaktadır. Böylece, yakıt daha verimli bir şekilde yanmaktadır. Düşük viskozite ise yakıtın çok daha küçük boyutlarda damlacıklara ayrılmasına neden olmaktadır. Yakıt damlacıklarının çok küçük olması, silindir içerisinde damlacık hareketini zorlaştırarak homojen yakıt-hava karışımı üzerinde olumsuz etki yaratmaktadır. Ayrıca düşük viskozite, yakıt sistemindeki sızıntıları arttırmaktadır (Erdoğan, 2019; Karahan, 2011). Biyodizelin viskozitesi D100' e göre daha yüksektir. n-Oktanolün viskozitesi de biyodizelden daha yüksektir. Dolayısıyla, biyodizel ve n-oktanol karışım yakıtın viskozitesi biyodizelden daha yüksek bir değere sahip olmaktadır (Ashok ve ark., 2019). Yakıt ve yakıt karışımlarına MWCNT ilavesinin kinematik viskoziteyi artışa neden olduğu yapılan çalışmalarla rapor edilmiştir (El- Seesy ve Hassan, 2019; Sateesh ve ark., 2023). B_2O_3 nanopartiküllerinin yakıtın akışını zorlaştırdığı ve bu nedenle viskoziteyi arttırdığı bildirilmiştir (Çakmak ve Özcan, 2022).

5.4.3. Setan sayısı

Setan sayısı dizel motorlarda kullanılan yakıtların kendi kendine tutuşma kabiliyetini belirlemede kullanılan bir ölçüdür. Setan sayısının artışı, yakıtın kendiliğinde tutuşmasını kolaylaştırmaktadır. Setan sayısı, TG süresini etkilemektedir. Düşük setan sayısı TG'yi arttırmakta, yüksek setan sayısı ise düşürmektedir. Setan sayısının düşük olması kontrolsüz yanma safhasına kadar yanmamış yakıt miktarını arttırmaktadır. Oluşan zengin karışım yanma sırasında kirletici egzoz emisyonlarını arttırmaktadır. Yüksek setan sayısı ise TG süresini kısalttığından dolayı homojen karışım için gerekli süreyi kısaltmaktadır. Aynı zamanda, yakıtın küçük zerrelere ayrılması, ısı alıp buharlaşması için yeterli süre kalmadığından yanma performansı düşmektedir (Sarıkoç, 2019). Biyodizelin setan sayısı D100'den daha yüksek iken, n-oktanal D100'e göre daha düşük setan sayısına sahiptir. Biyodizele n-oktanol ilavesi setan sayısını azaltmaktadır (Ashok ve ark., 2019). Birçok çalışmada, yakıtlara nanopartikül ilavesinin setan sayısını arttırdığı bildirilmiştir (El-Seesy ve Hassan, 2019; Ooi ve ark., 2023).

5.4.4. Isıl değer

Isıl değer, yakıtın birim kütlesinin enerjisi olarak ifade edilir. Yakıtın yanmasıyla açığa çıkan ısı enerjisidir. Birimi kJ/kg'dır. Başka bir ifadeyle yanma reaksiyonu sonunda meydana gelen ürünlerin, referans bir sıcaklığa göre entalpilerinin toplamının, yakıtın kütlesine oranıdır. Yakıtların ısıl değerlerinin yüksek olması, motor performansı açısından önemlidir (Sayın ve ark., 2021). Yanma sonu ürünleri arasında su buhar halinde ise alt ısıl değer, sıvı halde hesaplanmış ise üst ısıl değer olarak ifade edilir. Biyodizel yakıtların ve kısa zincirli alkollerin ısıl değerleri, dizel yakıtlardan daha düşüktür (Razak ve ark., 2021). Bu nedenle, motor gücü ve torku dizel yakıta kıyasla genellikle düşüktür. Bu çalışmada, kullanılan biyodizel ve n-oktanolün oksijen içerikleri nedeniyle alt ısıl değerleri D100'den daha düşüktür. Yakıtlara MWCNT nanopartikül ilavesinin yakıtların ısıl değerlerini arttırdığı yapılan çalışmalarla rapor edilmiştir (El-Seesy ve ark., 2022; Atelge ve ark., 2022; Ooi ve ark., 2023; Ramalingam ve ark., 2023). Ancak, Çakmak ve Özcan'ı yaptığı çalışmada B_2O_3 katkısının yakıtın üst ısıl değerini düşürdüğü ifade edilmiştir (Çakmak ve Özcan, 2022).

5.4.5. Uçuculuk

Petrol türevli yakıtlar, farklı hidrokarbon bileşiklerinin karışımlarından oluşmaktadır. Hidrokarbonlar ise karbon ve hidrojen sayısına bağlı olarak ısıl değer, yoğunluk, viskozite, setan sayısı, parlama noktası ve ateşleme sıcaklığı gibi farklı fiziksel ve kimyasal özelliklere sahiptirler. Farklı özelliklere sahip olan hidrokarbonlar farklı kaynama noktasına sahiptir. Bir yakıtın kaynama noktası sıcaklığı ne kadar düşükse uçuculuğu o derece yüksektir (Sayın ve ark., 2021). Uçuculuk, yakıtların buharlaşma kabiliyeti olarak tarif edilir. Uçuculuğu yüksek olan yakıtlar, uçuculuk yeteneği az olan yakıtlara kıyasla daha düşük sıcaklıkta buharlaşmaktadır. Uçuculuk yeteneği yüksek olan yakıtlar hava ile daha homojen karışım oluşturmakta ve yanma sürecini iyileştirmektedir (Acaroğlu ve ark., 2010).

5.4.6. Parlama noktası

Parlama noktası içten yanmalı motorların çalışma performansını doğrudan etkileyen bir parametredir. Uçuculuğu yüksek olan yakıtların, hava ile daha homojen bir karışım oluşturması kolaylaşmaktadır. Yakıtların sahip olduğu parlama noktası bulunduğu bölgenin sıcaklığına eşit olduğunda veya düşük olması durumunda, tutuşma gerçekleşir ve hızlı bir şekilde yanabilir. Parlama noktası, yakıt buharının tutuşabileceği en düşük sıcaklığı ifade etmektedir. Biyodizelin ve n-oktanolün parlama noktası D100'e kıyasla daha yüksek bir sıcaklığa sahiptir. MWCNT katkısının yakıtların parlama noktasını arttırdığını gözlemlenmiştir (Ramalingam ve ark., 2023). Başka bir çalışmaya göre ise azalttığı yönündedir (Sateesh, 2023). B_2O_3 nanopartiküllerinin de parlama noktasını düşürdüğü bildirilmiştir (Çakmak, 2021).

5.4.7. Tutuşma noktası

Tutuşma noktası, hava yakıt karışımın tutuştuktan sonra yanma olayını sürdürdüğü minimum sıcaklıktır. Tutuşma noktası sıcaklığı, parlama noktası sıcaklığından daha yüksektir. Bu nedenle, dizel motorlarda yakıtın tutuşmasını sağlamak için yüksek sıkıştırma oranına ihtiyaç duyulmaktadır. Sıkıştırma oranın yüksek olması, silindir içerisine alınan havanın sıcaklığını yükseltmekte ve püskürtülen yakıtın buharlaşmasını sağlayarak yakıtın tutuşmasını sağlamaktadır.

6. HESAPLAMALAR

Bu bölümde, test yakıtlarının fiziksel ve kimyasal özellikleri göz önünde bulundurularak, deney sırasında ölçülen çeşitli parametreler kullanılarak motor performansı, özgül egzoz emisyonları ve yanma karakteristikleri hesaplanmıştır. FÖYT, FÖET, FTV, giriş havası yoğunluğu, karışım yakıtların setan sayısı, karışım yakıtların yoğunluğu, volumetrik verim, hava-yakıt oranı, yanma verimi, anlık silindir hacmi ve ısı dağılımı hesaplanmıştır. Ayrıca, deneylerde ölçülen ve hesaplanan parametrelerin hata analizi yapılmıştır.

6.1. Motor Performans Hesabı

Tork ve efektif motor gücü, otomatik olarak hesaplanmakta ve deney düzeneğine bağlı bulunan bilgisayarlardan direkt olarak okunmaktadır. Diğer motor performans parametrelerinden FÖYT, FÖET ve FTV, efektif motor gücü, saatlik yakıt tüketimi ve yakıtın alt ısıl değerleri ile hesaplanmaktadır. Motor performans parametreleri arasında olan yanma verimi egzoz emisyonları değerleri, yakıtın alt ısıl değeri ve emisyonların oluşum entalpileri ile hesaplanmıştır. EGS ise, egzoza bağlı sıcaklık sensörünün bilgisayara gönderdiği bilgilerden direkt okunmuştur.

6.1.1. Motor momenti

İçten yanmalı bir motorun iş yapabilme yeteneği döndürme momenti ile tayin edilmektedir. Döndürme momenti ise çeşitli dinamometreler vasıtasıyla belirlenmektedir. Dinamometreler içten yanmalı bir motorun ürettiği kuvveti, döndürme momenti veya güç çıkışı gibi motor performansının belirlenmesinde kullanılan yöntemlerden biridir (Alfaiz ve ark., 2014; Kaisan ve Pam, 2013). Bu çalışmada, motor karakteristiklerinin belirlenmesinde Eddy Current dinamometre kullanılmıştır. Motor momenti (M_d), test düzeneğine bağlı bilgisayarlardan direkt olarak okunmuştur.

6.1.2. Efektif motor gücü

Silindir içerisinde yakıtın yanmasıyla meydana gelen enerjinin bir kısmı radyasyon, soğutma suyu ve egzoz yoluyla kaybedilmektedir. Arta kalan enerji, pistonu hareket ettirecek olan indike gücü oluşturmaktadır. İndike gücün bir kısmı da çıkış miline gelene kadar sürtünme ve motorun çalışmasını sağlayacak yardımcı elemanlara harcanmaktadır.

Bu aşamada harcanan toplam güç, sürtünme gücü (N_f) olarak ifade edilmektedir. Geriye kalan güç motorun çıkış milinden alınmaktadır. Efektif güç ($N_{e,1}$) içten yanmalı motorun çıkış milinden alınan güçtür (Çetinkaya, 2013). Faydalı güç ve fren gücü olarak da adlandırılmaktadır. Motor gücü, eşitlik (6.1)'de verilmiştir (Özsezen, 2007).

$$N_{e,1} = \frac{n \cdot M_d}{9549,3} \text{ (kW)} \quad (6.1)$$

Deney ortamının basıncı (P_0), sıcaklığı (T_0) ve nemi, motorun efektif gücünü etkileyebilmektedir. Farklı ortam koşullarında gerçekleştirilen deneysel çalışmaların verilerinin karşılaştırılabilmesi için standart ortam şartlarına dönüştürülmeleri gerekmektedir. Standart ortam koşullarındaki basınç $P_{atm} = 101,3\ kPa$, sıcaklığı ise $T = 293\ K$'dir. Böylelikle, standart ortam koşullarına uygun olan motor gücü ($N_{e,2}$) aşağıdaki (6.2) numaralı eşitlikten elde edilebilmektedir (Balki, 2013).

$$N_{e,2} = N_{e,1} \cdot \frac{101,3}{P_0} \cdot \frac{T_0}{293} \text{ (kW)} \quad (6.2)$$

6.1.3. Fren özgül yakıt tüketimi

Yakıt tüketimi birim zamanda harcanan yakıta denir. Yani yakıt debisini ifade etmektedir. FÖYT birim zamanda birim güç başına harcanan yakıt miktarı olarak tanımlanmaktadır. Başka bir deyişle, yakıt debisinin motor gücüne oranıdır. Hacimsel metotlara göre tasarlanmış deney düzeneklerinde, öncelikle yakıtın hacimsel debisi belirlenir. Belirlenen hacimsel debi yakıt yoğunluğu ile çarpılarak kütlesel debi (6.3) eşitliği ile hesaplanmaktadır (Aydın, 2014).

$$\dot{m}_y = \frac{\Delta V \cdot 10^{-6} \cdot 3600}{\Delta t} \cdot \rho_y \text{ (kg/h)} \quad (6.3)$$

Burada,

$\dot{m}_y$: kütlesel yakıt tüketimi (kg/h)

ΔV : harcanan yakıt hacmi (ml)

Δt : ΔV hacmindeki yakıtın tüketilme zamanı (s)

ρ_y : yakıtın yoğunluğu (kg/m^3)'dur.

Burada kullanılan ρ_y saf bir yakıtın yoğunluğudur. Ancak, yakıt karışım halinde ise yakıt yüzdeleri göz önünde bulundurularak yeni yoğunluk, yani karışımın yoğunluğu, ρ_k hesaplanır (Balki, 2013).

$$\rho_k = \sum(x_i \cdot \rho_i) = \rho_a \cdot x_a + \rho_b \cdot x_b \quad (6.4)$$

Denklem (6.4)'te ρ_a ve ρ_b harmanlanacak olan yakıtların yoğunlukları, x_a ve x_b ise sırası ile a yakıtının hacimsel yüzdesi ve b yakıtının hacimsel yüzdesidir. Karışım yakıtın yoğunluğu denklem (6.3)'te yerine konularak yakıtın kütlesel debisi ($\dot{m}_y$) belirlenebilir. Aşağıdaki ifadeden motorun FÖYT'si hesaplanabilir.

$$F\ddot{O}YT = \frac{\dot{m}_y}{N_{e,2}} \cdot 10^3 \text{ (g/kWh)} \quad (6.5)$$

Karışım yakıtların setan sayısı (SS_k) aşağıdaki eşitlik yardımıyla hesaplanmıştır (Gülüm, 2023).

$$SS_k = \sum(x_i \cdot SS_i) = x_a \cdot SS_a + x_b \cdot SS_b \quad (6.6)$$

6.1.4. Fren özgül enerji tüketimi

FÖET, birim zamanda birim güç başına tüketilen enerji miktarıdır FÖYT ile yakıtın ısıl değerinin çarpımına eşittir. Yakıtların alt ısıl değerlerinin farklı olması durumda, birim zamanda ve birim güç başına hangi yakıt ile ne kadar enerji tüketildiği konusunda karşılaştırma olanağı sağlar. Eşitlik (6.7) ile hesaplanmaktadır (Das ve ark., 2022).

$$F\ddot{O}ET = F\ddot{O}YT \cdot H_u \text{ (MJ/kWh)} \quad (6.7)$$

Burada;

H_u, yakıtın alt ısıl değerini ifade eder (MJ/kg)

6.1.5. Fren termik verim

Motorun çıkış milinden elde edilen işin, verilen toplam enerjiye oranı FTV olarak tanımlanmaktadır.

$$\eta_t = \frac{W_e}{Q_T} = \frac{W_e/t}{Q_T/t} = \frac{N_{e,2}}{\dot{m}_k \cdot H_u} = \frac{1}{FÖYT \cdot H_u} \quad (6.8)$$

Saf yakıt kullanıldığında alt ısıl değeri olan H_u (kJ/kg) kullanılmaktadır. Karışım yakıtlarda her bir yakıtın ısıl değeri birbirlerinden farklı olduğu için karışım yakıtın alt ısıl değerinin ($H_{u,k}$) hesaplanması gerekmektedir. $H_{u,k}$ denklem (6.9)'da belirtildiği gibi hesaplanmaktadır (Balki, 2013).

$$H_{u,k} = \frac{\sum(x_i \cdot \rho_i \cdot H_{u,i})}{\sum(x_i \cdot \rho_i)} = \frac{x_a \cdot \rho_a \cdot H_{u,a} + x_b \cdot \rho_b \cdot H_{u,b}}{x_a \cdot \rho_a + x_b \cdot \rho_b} \quad (6.9)$$

6.1.6. Giriş havasının yoğunluğu

Motor karakteristiklerini belirleyen en önemli parametrelerden biri, motora alınan gerçek hava miktarıdır ($\dot{m}_{g,H}$). Silindir içerisine alınan hava miktarı motor performansı ve egzoz emisyonlarını önemli ölçüde etkilemektedir (Balki, 2013; Özsezen, 2007; Türkcan, 2006). Giriş havasının yoğunluğu, hava/yakıt oranı ve volumetrik verim bilgilerinin elde edilebilmesinde önem arz etmektedir. Bu bağlamda, motorun çalışma sınırları ve emisyon özelliklerinin değerlendirilmesi açısından önemlidir. Giriş havasının yoğunluğu, emme manifoldundaki havanın sıcaklık ve basınç bilgileri (6.10) eşitliği ile hesaplanmaktadır (Ferguson ve Kirkpatrick, 2016).

$$\rho_{hava,in} = \frac{P_m}{R \cdot T_m} \quad (6.10)$$

Burada;

$\rho_{hava,in}$: Emme manifoldundaki havanın yoğunluğu (kg/m^3)

P_m : Emme manifoldu hava basıncı (kPa)

T_m : Emme manifoldu hava sıcaklığı (K)

R : İdeal gaz sabiti (kJ/kg K)

6.1.7. Volumetrik verim

Emme zamanında pistonun ÜÖN'den AÖN'ye hareketi sırasında içeri alınan hava, emme supabı, emme kanalı ve hava filtresi gibi sistemlerden dolayı akış kısıtlamasına maruz kalarak emilen hava miktarını sınırlandırmaktadır (Şengün, 2014; Pesic ve ark., 2013).

Emme zamanında pistonun hareketi sırasında bu dirençten dolayı silindir içerisine alınan havanın kütlesel debisi, teorik kütlesel debisinden daha düşük bir değerde olmaktadır. İçten yanmalı, 4 zamanlı bir motorun emme zamanı etkinliği volumetrik verim ile belirlenmektedir. Bir motorun belirli şartlar altında (hava sıcaklığı, basıncı vb.) gerçekte silindir içerisine aldığı hava miktarının ($\dot{m}_{g,H}$), aynı çalışma koşullarında teorik olarak emdiği hava miktarına ($\dot{m}_{t,H}$) oranı volumetrik verim (η_v) olarak adlandırılmaktadır. Aşağıda verilen ifade ile hesaplanmaktadır (Sürmen ve ark., 2019).

$$\eta_v = \frac{\dot{m}_{g,H}}{\dot{m}_{t,H}} = \frac{\rho_{g,H} \cdot \dot{V}_H}{\rho_{t,H} \cdot z \cdot V_S \cdot i \cdot n} = \frac{\rho_{g,H}}{\rho_H} \tag{6.11}$$

6.1.8. Hava-Yakıt Oranı

Hava yakıt oranının hesaplanması için kütlesel hava akışının belirlenmesi gerekmektedir. Havanın kütlesel debisi eşitlik (6.12) yardımıyla hesaplanmıştır. Havanın kütlesel debisinin, yakıtın kütlesel debisine oranı hava yakıt oranına eşittir ve eşitlik (6.13) ile hesaplanmıştır (Sürmen ve ark., 2019).

$$\dot{m}_{g,H} = \frac{n \cdot 60}{i} \cdot \rho_{g,H} \cdot V_H \tag{6.12}$$

$$H/Y = \frac{\dot{m}_{g,H}}{\dot{m}_y} \tag{6.13}$$

6.1.9. Yanma verimi

Silindir içerisine enjekte edilen yakıtın kimyasal enerjisinin tamamı açığa çıkmamaktadır. Yanma süreci sona erdiğinde tam yanma ürünlerinin yanı sıra eksik yanma ürünleri de açığa çıkmaktadır. Tam yanma ürünü olmayan CO ve HC okside olmayıp CO_2 ve H_2O'ya dönüşemediği için kayıp bir enerji ortaya çıkar. NO_x oluşumu da başka bir kayıp enerji oluşturur. Yakıtın alt ısıl değeri ve gazların oluşum entalpileri hesaba katılarak yanma verimi aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır (Heywood, 1988).

$$\eta_y = \frac{m(\sum_{i,girenler} n_i \Delta\tilde{h}_{f,i} - \sum_{i,ürünler} n_i \Delta\tilde{h}_{f,i})}{m_y \cdot H_u} \tag{6.14}$$

Burada;

η_y : Yanma verimi

m : Hava ve yakıtın kütlesi (kg)

n_i : Girenler veya ürünlerin mol sayısı

$\Delta\tilde{h}_{f,i}$: Girenlerin ya da ürünlerin oluşum entalpisi (kJ/kg)

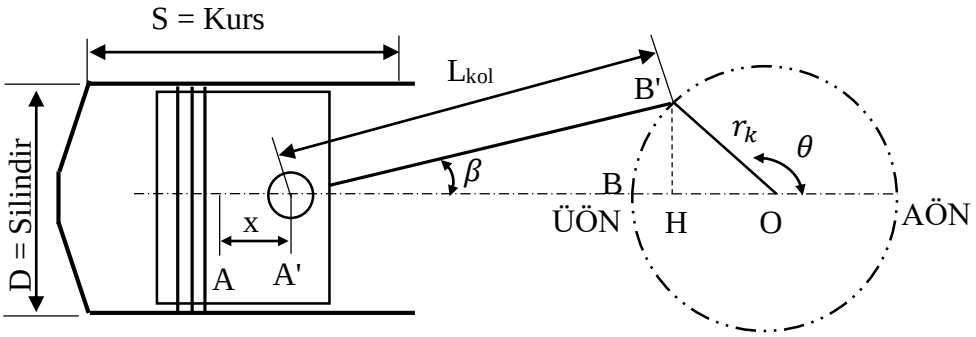
m_y : Yakıtın kütlesi (kg)

6.2. Yanma Analizi

Yanma sırasında silindir içerisinde meydana gelen anlık basınç değerleri ve pistonun yer değiştirmesi ile silindir içi hacim değişiminin belirlenmesi, içten yanmalı motorlarda yanma analizinin hesaplanabilmesi için gerekli verilerdir. Bu verilerin değişimi, her bir krank mili açısına (KMA) göre belirlenir. Pistonun anlık yer değişimi KMA'ya bağımlı şekilde ifade edildiğinde, anlık hacim değişimi de KMA'ya bağımlı olarak türetilebilmektedir. KMA'ya göre değişen hacim ve basınç verileri yardımıyla ısı dağılımı belirlenerek yanma analizi yapılabilmektedir (Balki, 2014; Doğan, 2012; Erdoğan, 2019).

6.2.1. Anlık silindir hacmi

Toplam silindir hacminin KMA'ya göre değişimini belirleyebilmek için test motorunun krank-biyel mekanizmasının boyutlarının bilinmesi gerekmektedir. Bu mekanizmanın geometrik ölçüleri kullanılarak anlık veya KMA'ya göre türetilmiş bağıntılar yoluyla toplam silindir hacmi hesaplanabilmektedir. Elde edilen anlık silindir hacmi verileri ile ısı dağılımı hesaplanmaktadır.



Şekil 6.1. Krank biyel mekanizmasının şematik görünümü

Şematik gösterimde;

$\overline{A'B'} = \overline{AB} = L_{kol}$: biyel kolu uzunluğunu,

$\overline{OB'} = \overline{OB} = r_k$: krank mili kol yarıçapını ifade etmektedir.

Anlık mesafe $x(\theta)$, krank mili açısına bağlıdır. $x(\theta)$, Şekil 6.1'de verilen boyutlara ve açılara göre trigonometrik yöntemler ile hesaplanmaktadır.

$$x = \overline{AA'} = \overline{AO} - \overline{A'O} \tag{6.15}$$

$\overline{A'O}$ uzunluğunun Şekil 6.1'deki trigonometrik eşitliği aşağıdaki gibidir.

$$\overline{A'O} = L_{kol} \cdot cos\beta - r_k \cdot cos\theta \tag{6.16}$$

Bununla birlikte, $\overline{A'B'} = L_{kol}$ ve $\overline{OB'} = r_k$'nın yatay bileşenleri dikkate alınarak (6.15) eşitliği aşağıdaki gibi düzenlenir.

$$x = L_{kol} \cdot (1 - cos\beta) + r_k \cdot (1 + cos\theta) \tag{6.17}$$

İfadeyi krank mili açısı (θ) cinsinden ifade edebilmek için krank ve biyel kollarının dikey bileşenleri dikkate alınır.

$$sin\beta = \frac{r_k}{L_{kol}} \cdot sin\theta \tag{6.18}$$

$$\lambda = \frac{r_k}{L_{kol}} \tag{6.19}$$

$sin^2\beta + cos^2\beta = 1$ olduğundan,

$$cos\beta = \sqrt{1 - \lambda^2 \cdot sin^2\theta} \rightarrow cos\beta = (1 - \lambda^2 \cdot sin^2\theta)^{\frac{1}{2}} \quad (6.20)$$

$cos\beta$, (6.20)'deki gibi düzenlenir. Bu ifade binom serisinde açıldığında λ^4, λ^6 gibi artan kuvvet değerlerinden dolayı sıfıra yaklaşmaktadır. Bu değerler ihmal edilerek (6.21) eşitliği elde edilir.

$$cos\beta = 1 - \frac{1}{2}\lambda^2 \cdot sin^2\theta \quad (6.21)$$

Elde edilen bu ifade (6.17) nolu eşitlikte yerine yazılırsa, krank açısına bağlı anlık yolun $x(\theta)$, en sade şekli (6.22)'de verildiği gibi olur.

$$x(\theta) = r_k \left(1 + cos\theta \pm \frac{\lambda}{2} \cdot sin^2\theta\right) \quad (6.22)$$

Krank mili açısına bağlı olan anlık toplam silindir hacmi $V_T(\theta)$, yanma odası hacmi (V_y) ile KMA'ya bağlı olan kurs hacmi $V_s(\theta)$'nın toplamına eşittir. $V_s(\theta)$ ise anlık kurs boyu $x(\theta)$ ile pistonu kesit alanı A_p'nin çarpımına eşittir. Eşitlik (6.22)'de yerine yazılarak pistonun krank mili açısına (θ) bağlı anlık süpürme hacminin ifadesi elde edilmektedir.

$$V_y = \frac{V_s}{\varepsilon - 1} \quad (6.23)$$

$$V_T(\theta) = \frac{V_s}{\varepsilon - 1} + x(\theta) \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4} \quad (6.24)$$

6.2.2. Silindir içi gaz basıncı

Silindir içi basınç verileri, yanma sürecinde ısı dağılımının hesaplanmasında, dolayısıyla yanma analizinin yapılmasına olanak sağlamaktadır. Deneysel çalışmalarda belirli bir gaz konumunda ve sabit motor hızlarında püskürtülen yakıt hacmi sabittir. Fakat karışım yakıtlarda kullanılan yakıtların enerji yoğunlukları birbirlerinden farklı olduğu için silindir gaz basıncında farklılık yaratmaktadır. Aynı zamanda, bu durum çevrimden çevrime de farklılık oluşturmaktadır (Erdoğan, 2019; Balki, 2014). Bu değişimleri en aza indirebilmek için 50 çevrimin ortalaması dikkate alınmıştır. Basınç sensörlerinden okunan gösterge basınçlarına atmosfer basıncı eklenerek elde edilen mutlak basınç verileri, hesaplamalarda dikkate alınmaktadır.

$$P_{mut} = P_{gös} + P_{atm} \quad (6.25)$$

Krank açısı cinsinden basınç verilerinde gözlenen farklılıkları en düşük seviyeye indirmek amacıyla dijital low-pass filtre kullanılmıştır (Brown, 2001).

$$dP = \frac{(2\cdot(P_{\theta-4}+P_{\theta+4})+3\cdot(P_{\theta-3}+P_{\theta+3})+4\cdot(P_{\theta-2}+P_{\theta+2})+5\cdot(P_{\theta-1}+P_{\theta}+P_{\theta+1}))}{33\cdot d\theta} \quad (6.26)$$

6.2.3. Isı dağılımı

Sıkıştırma ve iş zamanında silindir içi basıncın her bir krank açısına göre değişimi, yanma işleminin kalitesi hakkında önemli bilgiler sunmaktadır. Söz konusu bilgiler, yakıtın yanma sırasında bünyesindeki kimyasal enerjisinin açığa çıkardığı ısı enerjisidir. Isı dağılımı, kapalı sistemler için termodinamiğin birinci kanunu kullanılarak elde edilmektedir. Termodinamiğin birinci yasası ve enerji korunumu ilkesine göre sistemden ya da sisteme ısı veya iş olarak net enerji geçişinin, sistemin toplam enerjisindeki değişime eşit olduğunu belirtmektedir (Doğan, 2012; Çengel ve Boles, 1996).

$$Q_{net} - W = \Delta E \quad (6.27)$$

Burada;

Q_{net} : Silindir duvarlarına giden net ısıyı (kJ),

W : Hareketli sınır işini (kJ),

ΔE : Sistemin toplam enerji değişimidir (kJ).

Sistemin iç enerjisi (U), kinetik enerjisi (KE) ve potansiyel enerjisi (PE) sistemin toplam enerjisi E'yi oluşturmaktadır. Başka bir deyişle, söz konusu enerji değişimleri toplam enerji değişimini ΔE'yi oluşturmaktadır. Ancak, incelenen sistemin hal değişimi sırasında, hızında veya kütle merkezinin bulunduğu noktada çok küçük bir değişiklik olduğundan ihmal edilebilir (Çengel ve Boles, 1996). Bu durumda, $\Delta E = \Delta U$ olmaktadır. Bu durumda birinci yasa, $Q_{net} - W = \Delta U$ ifadesi, birim zaman için eşitlik (6.28) olarak yazılabilir.

$$\dot{Q}_{net} - \dot{W} = \frac{dU}{dt} \quad (6.28)$$

İç enerji (U) sıcaklığın fonksiyonudur. Sabit hacimde özgül ısının (c_v) tanımı dikkate alındığında, zamana bağlı iç enerji değişimi (6.29) eşitliği ile ifade edilir.

$$\frac{dU}{dt} = m \cdot c_v \cdot \frac{dT}{dt} \tag{6.29}$$

Piston silindir düzeneğinde sistem sınırının yer değiştirmesiyle meydana gelen sınır işi $\dot{W}$ ve zamana bağlı iç enerji, eşitlik (6.28)'da yerine yazılarak (6.30) elde edilir.

$$\dot{Q}_{net} = m \cdot c_v \cdot \frac{dT}{dt} + P \cdot \frac{dV}{dt} \tag{6.30}$$

Aşağıda ideal gaz denkleminde sıcaklık yalnız bırakılıp kütle sabit kabul edilerek zamana göre türevi alınırsa (6.31) numaralı ifade elde edilir.

$$\frac{dT}{dt} = \frac{1}{m \cdot R}\left[V\frac{dP}{dt} + P\frac{dV}{dt}\right] \tag{6.31}$$

Bu ifade, (6.30) numaralı eşitlikte yerine yazılıp düzenlenirse (6.32) ifadesi türetilir.

$$\dot{Q}_{net} = \left[\frac{c_v}{R} + 1\right] P\frac{dV}{dt} + \frac{c_v}{R} \cdot V\frac{dP}{dt} \tag{6.32}$$

(6.31) numaralı denklemde yer alan $\frac{c_v}{R}$ ifadesi özgül ısılar oranı (k) türünden yazılabilir. k, silindir içi gaz sıcaklığına göre değişmektedir (Şanlı ve ark., 2018).

$$k = 1{,}338 - 6 \cdot 10^{-5} \cdot T_g + 10^{-8} \cdot T_g^2$$

Burada T_g, gaz sıcaklığıdır ve belirli bir referans noktadaki, basınç, hacim ve sıcaklık değerleri kullanılarak ideal gaz kanununa göre hesaplanır.

Bu ifade eşitlik (6.32) denkleminde yerine yazılır ve zamana göre değişim (dt), krank mili açısı ($d\theta$) türünden ifade edilirse (6.33) bağıntısı elde edilir.

$$\dot{Q}_{net} = \frac{dQ_{net}}{d\theta} = \left[\frac{k}{k-1}\right] \cdot P\frac{dV}{d\theta} + \left[\frac{1}{k-1}\right] \cdot V\frac{dP}{d\theta} \tag{6.33}$$

Elde edilen bağıntı net ısı dağılımını ifade etmektedir. Bu nedenle, dikkate alınması gereken bir diğer husus, silindir duvarındaki ısı transferidir. Net ısı dağılımı ile silindir duvarlarından iletilen ısı dağılımının toplamı brüt ısı dağılımını ifade etmektedir. Silindir duvarındaki ısı transferinin hesaplanmasında duvar sıcaklığının sabit ve üniform olduğu kabul edilmektedir. Bu çalışmada, silindir duvarındaki ısı transferi Eichelberg korelasyonu ile hesaplanmıştır (Özsezen, 2022).

$$\dot{Q}_{brüt} = \dot{Q}_{net} + \dot{Q}_{duvar} \quad (6.34)$$

$$\dot{Q}_{duvar} = h_{gaz} \cdot A_{duvar} \frac{d(T_g - T_{duvar})}{d\theta} \quad (6.35)$$

$$T_g = \frac{P_g \cdot V}{n \cdot R_u}, \text{ (K)} \quad (6.36)$$

$$h_g = 7.67 \cdot 10^{-6} (C_m)^{1/3} \cdot \left(P_g \cdot T_g\right)^{0,5}, \text{ (W/m}^2\text{K)} \quad (6.37)$$

Burada, n çalışma gazının mol sayısı, R_u evrensel gaz sabiti (J/mol K), h_g ısı transfer katsayısı (W/m²K), A_{duvar} silidir duvar yüzey alanıdır (m²), T_g silindirdeki kütle ortalamalı gaz sıcaklığı (K), T_{duvar} silindir duvar yüzeyi sıcaklığı (K), C_m ortalama piston hızı (m/s)

6.3. Özgül Egzoz Emisyonları

Deneysel çalışmada HC ve NO emisyonları ppm olarak CO_2 ise % olarak ölçülmüştür. Egzoz emisyonları, aşağıdaki eşitlikler kullanılarak g/kWh olarak hesaplanmıştır (Arbab ve ark., 2014; Wang ve ark., 2020).

$$HC_{(g/kWh)} = \frac{0,479 \cdot HC_{(ppm)} \cdot EKAO}{Ne_{,2} \cdot 1000} \quad (6.38)$$

$$NO_{(g/kWh)} = \frac{1,587 \cdot NO_{(ppm)} \cdot EKAO}{Ne_{,2} \cdot 1000} \quad (6.39)$$

$$CO_{2(g/kWh)} = \frac{0,0909 \cdot CO_{2(ppm)} \cdot EKAO}{60 \cdot Ne_{,2}} \quad (6.40)$$

Burada;

EKAO: Egzoz kütle akış oranı (kg/h)

6.4. Belirsizlik Analizi

Deneylerden elde edilen değerlerin belirsizliği, ölçüm cihazlarının bulunduğu ortam koşullarında, cihazın kalibrasyonundan, okuma tekniğinden ve ölçüm tekniğinden etkilenmektedir. Çalışmada ölçümler, egzoz gaz analizörü, test düzeneği üzerinde basınç sensörü, sıcaklık sensörü, motor hızı sensörü, yakıt tüketimi ölçme düzeneği yardımıyla elde edilmiştir. Bu deneysel çalışmada belirsizlik analizi, ölçülen her parametrenin

sonucu, ölçülen tüm değerlerin mutlak ortalama değeri olarak alındı. Denklem (6.41) ölçülen değerlerin ortalamasını hesaplamak için kullanılmıştır. Deneylerin belirsizliğini belirlemek için ölçülen parametrelerin standart sapması hesaplamıştır. Standart sapma (STD), (6.42)'de verilen formül kullanılarak hesaplanmıştır (Özsezen, 2022; Vargün ve ark., 2023).Motor gücü, FÖYT, FÖET, FTV, EGS, HC, NO, CO_2 ve maksimum basıncın standart sapma değerleri Tablo 6.1'de verilmiştir.

$$\bar{X} = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} X_i \tag{6.41}$$

$$STD = \left[\left(\frac{1}{N-1}\right)\sum_{i=1}^{N}(X_i - \bar{X})^2\right]^{\frac{1}{2}} \tag{6.42}$$

Tablo 6.1. Motor performans parametreleri ve emisyonların standart sapma değerleri

Parametreler	**Standart Sapma**	**Değişim Katsayısı**
Motor gücü (kW)	0,18	% 2,19
FÖYT (g/kWh)	11,72	% 3,66
FÖET (MJ/kWh)	0,46	% 3,6
FTV (%)	0,94	% 3.2
EGS (^{o}C)	0,27	% 0,09
P_{max} (bar)	1	% 0,7
HC (ppm)	0,38	% 2,1
NO (ppm)	4,83	% 0,6
CO_2 (%)	0,06	% 1,2

Tablo 6.1'de görüldüğü gibi ölçülen ve hesaplanan parametrelerin standart sapma değerleri ve değişim katsayısı verilmiştir. Maksimum standart sapma değeri FÖYT'de iken, minimum standart sapma CO_2 emisyonunda hesaplanmıştır. Tablo 6.1'de belirtilen tüm parametrelerin değişim katsayısı %4'ün altındadır.

7. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu bölümde, deneysel çalışmada kullanılan yakıt ve yakıt katkı maddelerinin özelliklerine değinilmiştir. Ayrıca, deney motorunun teknik özellikleri ve hassasiyetleri belirtilmiştir. Deney donanımın şematik görünümü ve fotoğrafları ile çalışmada kullanılan cihazların fotoğrafları paylaşılmıştır. Son olarak da deneyin yapılışı hakkında bilgi verilmiştir.

7.1. n-Oktanol

n-Oktanol uzun zincirli alkol gruplarındandır. Bünyesinde 8 adet karbon atomu bulundurmaktadır. Setan sayılarının yüksek olması, dizel motorlarda kullanımlarında avantaj sağlamaktadır. Merck marka n-oktanolün fizyokimyasal özellikleri Tablo 7.1'de verilmiştir.

Tablo 7.1. n-Oktanolün fizyokimyasal özellikleri

Özellikler	
Kimyasal formülü	$C_8H_{17}OH$
Kaynama noktası	195 ºC
Yoğunluk	0,83 g/cm^3 (20 ºC)
Parlama noktası	86 ºC
Alevlenme sıcaklığı	270 ºC
Setan sayısı	39
Kinematik viskozite	5,6 mm^2/s (40 ºC)
Isıl değer	39,55 (MJ/kg)

7.2. Sodyum Dodesil Sülfat (SDS)

Nanoakışkan bünyesindeki nanopartiküllerin kararlılığı (stabilitesi) için sürfaktan maddeler kullanılmaktadır. Bu çalışmada, aşağıdaki tabloda özellikleri verilen Tekkim marka SDS kullanılmıştır. SDS'ye ait özellikler Tablo 7.2'de verilmiştir.

Tablo 7.2. Sodyum dodesil sülfat özellikleri

Özellikler	
Kimyasal formülü	$C_{12}H_{25}OSO_2ONa$
Saflık	$\geq$ %92
Sodyum sülfat (Na_2SO_4)	$\leq$ %5
Sodyum klorür	$\leq$ %5
pH	8,5 – 10,5 (%1, H_2O, 20 °C)

7.3. Nanopartiküller

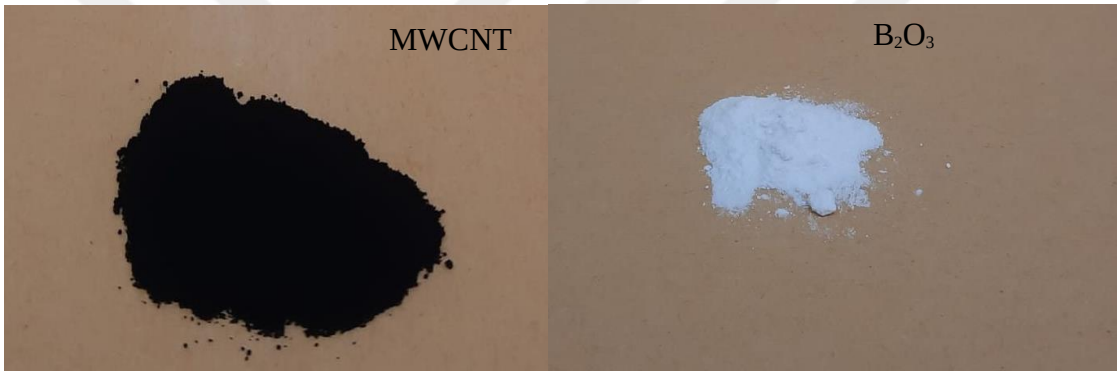
Deneysel çalışmada kullanılacak nanopartiküller, Nanografi Nano Teknoloji A.Ş.'den temin edilmiştir. MWCNT'ye ait özellikler Tablo 7.3'te, B_2O_3 olarak adlandırılan nanopartiküllere ait bazı özellikler ise Tablo 7.4'te verilmiştir. Şekil 7.1'de nanopartiküller gösterilmiştir.

Tablo 7.3. Çok duvarlı karbon nanotüplere ait özellikler

Parametreler	
Doğrusal formülü	C
Saflık (%)	$>$ 92
İç ve dış çap (nm)	5-10
Uzunluk (μm)	1-3
Özgül yüzey alanı (m^2/g)	290
Sıkıştırılmış yoğunluk (g/cm^3)	0,25
Gerçek yoğunluk (g/cm^3)	2,4
Görünüm	Siyah

Tablo 7.4. Boron oksit nanopartikülüne ait özellikler

Parametreler	
Kimyasal formülü	B_2O_3
Saflık (%)	99,95
Ortalama partikül boyutu (nm)	50
Moleküler ağırlık (g/mol)	69,62
Yoğunluk (g/cm^3)	2,46
Kaynama noktası (ºC)	1860
Erime noktası (ºC)	510
Görünüm	Beyaz kristal

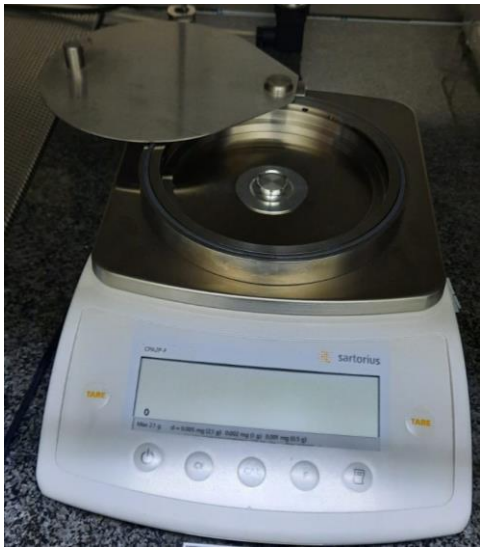


Şekil 7.1. MWCNT ve B_2O_3 nanopartikülleri

Deney motorunun yakıt sisteminde iki adet filtre kullanılmıştır. Bu filtrelerden ilki 35 µm, ikincisi ise 15-20 µm geçirgenliğe sahiptir. Nanopartiküllerin tanecik boyutuna göre filtre tıkanma noktası göz önüne alınarak filtreler kontrol edilmiştir.

7.4. Hassas Terazi

Test yakıtlarına eklenen nanopartikül katkı maddelerinin kütlelerinin ölçümünde, Sartorius CPA-2P-F hassas terazi kullanılmıştır. Şekilde 7.2'de görülen hassas terazi 2 g ölçme kapasitesine sahip olup 0,005 mg okunabilirliğe sahiptir.



Şekil 7.2. Nanopartikül ölçümünde kullanılan hassas terazi

7.5. Ultrasonik Karıştırıcı

Test yakıtlarına ilave edilen nanopartikül ve yüzey aktif maddelerin homojen bir şekilde dağılımı ve stabilitesi için Elma marka banyo tip ultrasonik karıştırıcı kullanılmıştır. Karıştırıcı 37 kHz frekansa ve 800W efektif güce sahiptir. Şekil 7.3'te ultrasonik karıştırıcı görülmektedir.

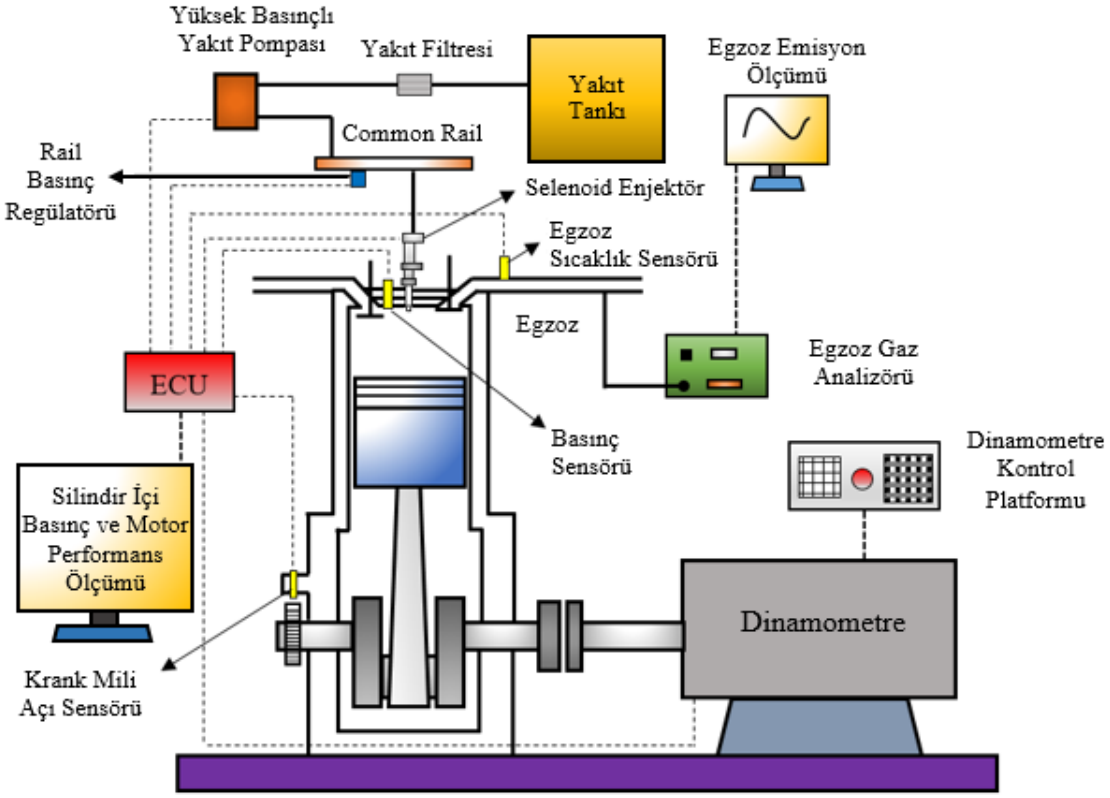


Şekil 7.3. Ultrasonik karıştırıcı

7.6. Deney Donanımı

Test çalışmasının yapıldığı deney donanımında; tek silindirli dizel motor, Eddy Current dinamometre, egzoz gaz ölçüm cihazı, yakıt ölçüm düzeneği, hava tüketimi ölçüm

ekipmanı, silindir içi basınç ölçüm düzeneği ve egzoz gaz sıcaklık termometresi bulunmaktadır. Deneysel çalışma, TÜBİTAK Raylı Ulaşım Teknolojileri Enstitüsünde gerçekleştirilmiştir. Deney düzeneğinin şematik görünümü Şekil 7.4'te, ölçüm cihazlarının listesi ve hassasiyetleri ise Tablo 7.5'te verilmiştir.



Şekil 7.4. Deney donanımının şematik görünümü

Tablo 7.5. Deney donanımında mevcut olan cihazlar ve hassasiyetleri

Parametreler	Cihaz	Hassasiyet
Tork	HBM tork flanşı	± 0,1 Nm
Motor hızı	AVL encoder	≤ ± 0,1 d/d
Test hücresi nemi	Vaisala-HMT-330	± % 1 RH
Test hücresi sıcaklığı	Vaisala-HMT-330	± 0,2 ºC
Enjeksiyon zamanı	Angle encoder	± 0,1 KMA
Silindir içi basınç	AVL Xion	0,05 bar
Supercharger-Boost hava sıcaklığı	AVL 515X	± 5 ºC
Yakıt tüketimi	AVL 735	< %0,15
Sıcaklık sensörü	PT100 (K tipi)	< ± %1
Motor soğutma sıvısı ve yağ sıcaklığı	AVL 577	± 1 K

7.6.1. Deney Motoru

Deney motoru olarak1,12 litre hacminde ve 16,4/1 sıkıştırma oranına sahip, tek silindirli, CRDI direkt püskürtmeli, su soğutmalı ve 50 kW gücünde bir dizel motor kullanılmıştır. Tablo 7.6'da deney motoruna ait teknik özellikler, Şekil 7.5'te deney motoru ve dinamometre görülmektedir.

Tablo 7.6. Deney motorunun teknik özellikleri

Özellikler	
Motor tipi	4 zamanlı, tek silindirli, sıkıştırma ile ateşlemeli
Silindir çapı	106 mm
Kurs boyu	127 mm
Motor hacmi	1120 cm^3
Sıkıştırma oranı	16,4:1
Maksimum güç (1500 d/d)	50 kW
Maksimum tork (1400 d/d)	160 Nm
Yakıt sistemi	CRDI-1800 bar
Yakıt pompası	Bosch yüksek basınçlı mekanik pompa
Emme ve egzoz supap sayısı	2, 1
Soğutma sistemi	Su soğutmalı (şebeke suyu ile şartlandırıcılı)
Yağlama sistemi	Kuru karter (şebeke suyu ile şartlandırıcılı)



Şekil 7.5. Deney motoru ve dinamometre

Bu deneysel çalışma, motorun standart püskürtme basıncı ve avansına göre yapılmıştır. Deney motorunun püskürtme basıncı ve avansı, motora entegre edilen ve AVL firması tarafından programlanmış ECU tarafından denetlenmektedir. Deney motorunun 1500 d/d sabit hızda yüke bağlı püskürtme basıncı ve avansının değişimi Tablo 7.7'de verilmiştir.

Tablo 7.7. Deney motorunun 1500 d/d'de yüke bağlı püskürtme basıncı ve avansı

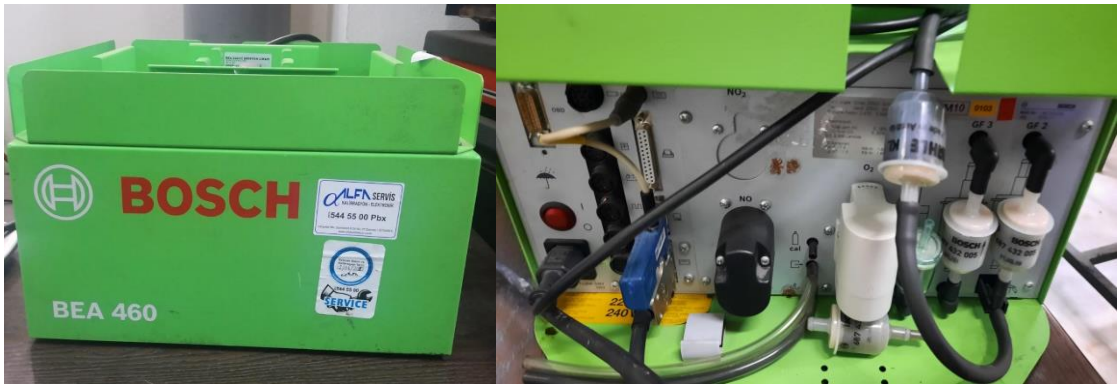
Motor yükü (%)	Püskürtme basıncı (bar)	Püskürtme avansı (KMA)
25	750	15
50	900	16
75	1300	17
100	1600	18

7.6.2. Egzoz gaz analizörü

Egzoz emisyonlarının ölçümünde, Bosch BEA 460 egzoz gaz analizörü kullanılmıştır. Emisyon ölçüm cihazı NO, O_2, HC, CO, CO_2 ve is emisyonları ölçülebilmektedir. Deneysel çalışma öncesinde, emisyon cihazına yetkili servis tarafından bakım ve kalibrasyon işlemleri yaptırılmıştır. Deneyler 3 kez tekrarlanarak tüm ölçümlerin ortalaması alınmıştır. Emisyon cihazına ait özellikler Tablo 7.8'de verilmiştir. Şekil 7.6'da egzoz gaz analizörü görülmektedir.

Tablo 7.8. Egzoz gaz analizörüne ait teknik özellikler

Özellikler	Ölçme aralığı	Hassasiyet
HC	0-10000 ppm	1 ppm
NO	0-5000 ppm	1 ppm
Hava fazlalık katsayısı	0,5-1,8	0,001
CO_2	0-18 % hacimsel	0,01 % hacimsel
O_2	0-22 % hacimsel	0,01 % hacimsel
CO	0-10 % hacimsel	0,001 % hacimsel
Opasite derecesi	0-100 %	0,1 %
Absorbsiyon katsayısı	0-10 m^{-1}	0,01 m^{-1}



Şekil 7.6. Egzoz gaz analizörü

7.7. Deneysel Çalışmada kullanılan test yakıtları

Deneysel çalışmada, yakıt olarak aşağıda verilen yakıtlar ve yakıt karışımları kullanılmıştır. Karışım yakıtların oranları, beher kullanılarak hacimsel olarak ölçülmüştür. Nanopartikül maddeler, hassas terazi kullanılarak karışım yakıtlara ilave edilmiştir.

D100 : Dizel yakıtı (%100)

B100 : Saf biyodizel (%100),

B95O5 : Biyodizel (%95) + n-oktanol (%5) harmanı,

B95O5100MWCNT : Biyodizel (%95) + n-oktanol (%5) harmanı + 100 ppm MWCNT

B95O5$B_2O_3$100 : Biyodizel (%95) + n-oktanol (%5) harmanı +100 ppm B_2O_3

B95O5$B_2O_3$150 : Biyodizel (%95) + n-oktanol (%5) harmanı +150 ppm B_2O_3

Literatür araştırması sonucunda, yakıtlara 100 ppm doz MWCNT ilavesinin optimum motor performansı sağladığı görülmüştür. 150 ppm doz MWCNT'nin filtrelerde tıkanmaya sebep olduğu gözlemlenmiştir. Bu nedenle, karışım yakıta MWCNT katkısı 100 ppm, B_2O_3 nanopartikülü ise 100 ppm ve 150 ppm dozlarda eklenmiştir. 1 litre yakıt harmanına kütlesel olarak100 ppm için 0,1g, 150 ppm için 0,15g nanopartikül ilave edilmiştir. Test yakıtlarına ilave edilen nanopartiküllerin yakıt içerisinde süspanse halde kararlılıklarını sağlamak için yüzey aktif madde kullanılmıştır. Nanopartikül maddelerin yakıt içerisinde kümelenmelerini engellemek ve homojen bir şekilde dağılımlarını sağlamak için banyo tip ultrasonikatör kullanılmıştır. D100 ve B100 bu çalışmada

referans yakıt olarak seçilmiştir. Bulgular her iki yakıt ile karşılaştırılarak değerlendirilecektir. D100, B100 ve B95O5 yakıtlarının fiziksel ve kimyasal özellikleri Tablo 7.9'da verilmiştir. Deney yakıtları Şekil 7.7'de gösterilmiştir.

Tablo 7.9. Deney yakıtlarının fiziksel ve kimyasal özellikleri

Özellikler	**D100**	**B100**	**B95O5**
Yoğunluk (kg/m^3)	820-845	883,70	881,02
Setan numarası	≥ 51	51,30	50,7
Alt ısıl değer (MJ/kg)	42,612	39,54	39,54
Kinematik viskozite (mm^2/s, 40 ^{o}C'de)	2-4,5	4,367	-
Parlama noktası (^{o}C)	≥55	171	-
Soğuk filtre tıkanma noktası (^{o}C)	-	-2	-
İyot değeri (g/100g)	-	109	-
Su içeriği (%)	0,02	0,020	-
Kaynama noktası (^{o}C)	160	-	-
Sülfür (mg/kg)	-	6,20	-

Deneylerde kullanılan B100'ün yakıt özellikleri, biyodizelin temin edildiği firma tarafından ITS Caleb Brett Deniz Survey A.Ş. İskenderun Laboratuvarı tarafından analiz edilmiştir. Biyodizelin teknik özellikleri Ek-1'de detaylı olarak verilmiştir. n-Oktanolun özellikleri satın alınan firmadan temin edilmiştir. n-Oktanolun ısıl değeri ise Yozgat Bozok Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezinde belirlenmiştir.



Şekil 7.7. Deney yakıtları

7.8. Motor Deneyleri

Deney sistemi, deney motoru, dinamometre, hava ve yakıt ölçüm sistemi, silindir için gaz basınç ölçüm ünitesi ve egzoz gaz analizörü ölçüm cihazından oluşmaktadır. Deneysel çalışmada tek silindirli, 1,16 litre süpürme hacmine sahip, su soğutmalı dört zamanlı sıkıştırma ateşlemeli bir dizel motor kullanılmıştır. Deneysel çalışmalara başlamadan önce motor yağı ve standart motor ayarları kontrol edilmiştir. Test cihazları kalibrasyonları yapılmıştır. Deney motorunun soğutma sıvısı sıcaklığı 70 ºC, motor yağı sıcaklığı 90 ºC'ye şartlandırılmıştır. Motorun püskürtme basıncı ve avansı standart değerlerine getirilmiştir. Araştırmada, doğru verilerin elde edilmesi için motor çalışma sıcaklığına getirilmiştir. Maksimum momentin belirlendiği hız 1500 d/d'de sabit tutularak testler dört farklı motor yükünde (%25, %50, %75 ve %100) gerçekleştirilmiştir. Deney yakıtlarıyla elde edilen yük testi verileri ile performans, egzoz emisyonu ve yanma karakteristiklerindeki değişimler, grafiksel olarak biçimlendirilip sonuçlar, literatür ile karşılaştırılarak tartışılmıştır.

8. BULGULAR VE TARTIŞMA

Deneylere başlamadan önce egzoz emisyon cihazının kalibrasyonu yapılmıştır. Test motorunda gerekli kontroller yapılmış ve deneyler motorun kararlı çalışmaya başlamasından sonra gerçekleştirilmiştir. Test motorunun soğutma suyu 70 ^{o}C, yağlama yağı ise 90 ^{o}C sıcaklıkta sabit tutulmuştur. Yeni bir deneye başlamadan önce motor 10 dakika boşta çalıştırılmıştır.

Bu bölümde 6 farklı yakıt (D100, B100, B95O5, B95O5100MWCNT, B95O5$B_2O_3$100 ve B95O5$B_2O_3$150) kullanılarak 1500 d/d sabit devirde ve farklı yüklerde (%25, %50, %75 ve %100) deneyler yapılmış ve elde edilen bulgular tartışılmıştır. Bu çalışmada, motor performans karakteristikleri olarak volumetrik verim, hava-yakıt oranı, motor gücü, FÖYT, FÖET, FTV, EGS ve yanma verimi, yanma karakteristikleri olarak silindir içi gaz basıncı ile ısı dağılımı ve emisyon karakteristikleri olarak da özgül NO, HC ve CO_2 değişimleri tartışılmıştır.

8.1. MWCNT İlaveli Test Yakıtlarının Performans, Emisyon ve Yanma Karakteristikleri

Bu bölümde, yakıt karışımına MWCNT ilavesinin motor performansına, yanma karakteristiklerine ve egzoz emisyonlarına olan etkileri grafiksel olarak gösterilmiştir. Bulgular literatür çalışmaları ile karşılaştırmalı olarak tartışılmıştır.

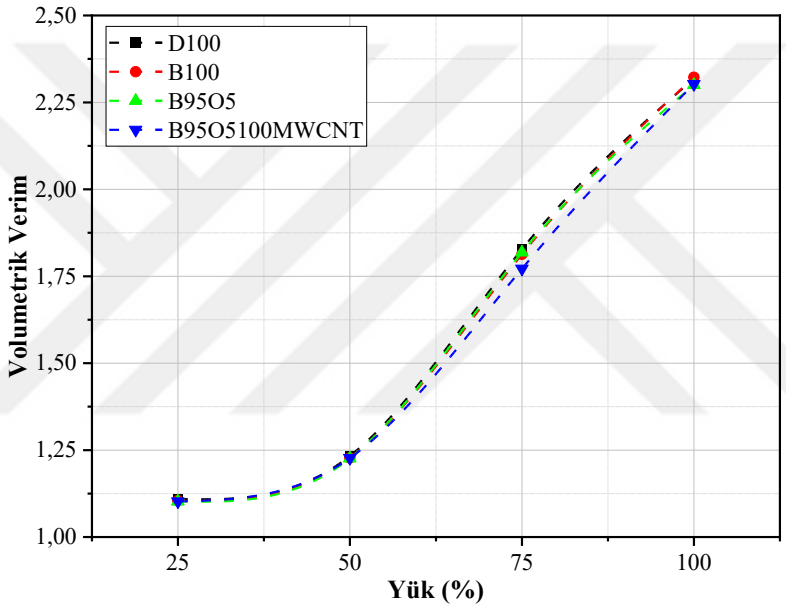
8.1.1. Motor performansı

Bir CRDI dizel motorun farklı motor yüklerinde fren motor gücü, FÖYT, FÖET, FTV, yanma verimi ve EGS gibi motor performans karakteristikleri karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Burada motor yükü, dizel motordaki yakıt kontrol kolunun (gaz pedalı) hareket yüzdesini ifade etmektedir. Örneğin, %25 pedal açıklığı, %25 motor yükü olarak ifade edilmiştir.

8.1.1.1. Volumetrik verim

Şekil 8.1'de motor yüküne bağlı volumetrik verimin değişimi gösterilmiştir. Bütün yük şartlarında test yakıtlarının volumetrik verimi 1'den yüksektir. Motor yükünün arttırılmasıyla yükselen silindir basıncından dolayı deney motorunda bulunan turboşarj

daha fazla miktarda havayı emme manifolduna gönderir. Bunun soncunda, emme manifoldundaki hava basıncı artar. Hava basıncının artmasıyla silindir içerisine teorik hava miktarında daha fazla miktarda hava gönderilir. Bu sayede, yük arttıkça tüm test yakıtları için volumetrik verim artmaktadır. Örneğin, B100'ü%25, %50, %75 ve tam yükteki volumetrik verimi sırasıyla, 1,1, 1,2, 1,8 ve 2,3'tür. Emme manifoldunda bulunan hava sıcaklığı ve basıncı test yakıtlarındaki farklılığa bağlı olarak kısmi bir değişikliğe uğramaktadır. Örneğin, %75 yük şartlarında D100, B100, B95O5 ve B95O5100MWCNT'nin volumetrik verimleri sırasıyla, 1,83, 1,81, 1,82 ve 1,80'dir. Bu nedenle, test yakıtlarının volumetrik verimleri birbirlerine yakındır.

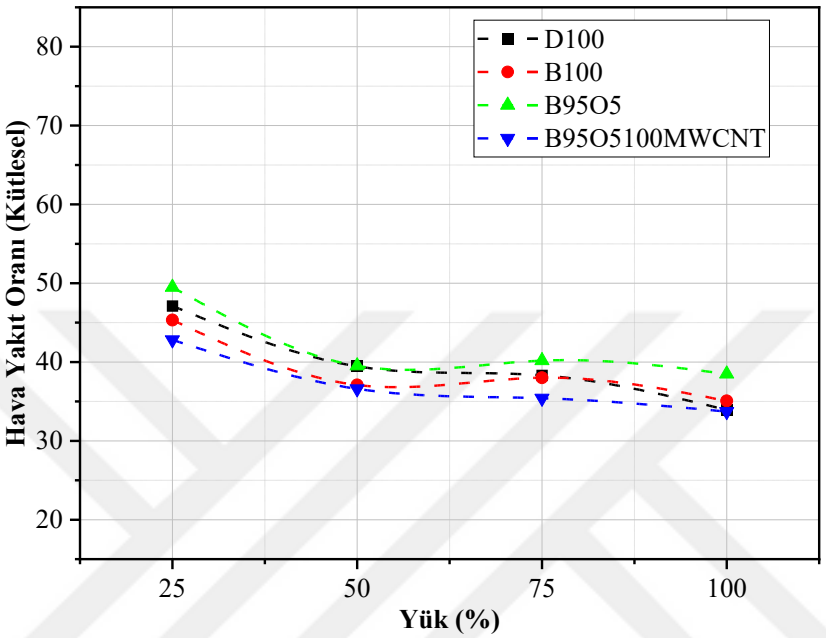


Şekil 8.1. Motor yüküne bağlı volumetrik verimin değişimi

8.1.1.2. Hava yakıt oranı

Şekil 8.2'de 1500 d/d'de motor yüküne bağlı hava/yakıt (H/Y) oranının değişimi gösterilmiştir. Motor yükü arttıkça tüm test yakıtları için H/Y oranının azaldığı görülmüştür. Örneğin, D100'ün %25, %50, %75 ve %100 yükteki H/Y oranı sırasıyla 47,11, 39,45, 38,31 ve 33,92'dir. Yük arttıkça, turboşarjın gönderdiği hava miktarı artmaktadır. Hava miktarına ve yük şartlarına bağlı olarak ECU tarafından motora daha fazla miktarda yakıt gönderilmektedir. Böylelikle silindir içerisinde daha zengin bir karışım oluşturulmaktadır. B100 ve B95O5100MWCNT yakıtlarının H/Y oranı D100'e göre değişimleri sırasıyla %2,1 ve %6,5 azalmıştır. B95O5'in H/Y oranı ise D100'e göre

%5,6 artmıştır. B95O5'in H/Y oranı B100'e göre yaklaşık %7,8 artarken, B95O5100MWCNT'nin H/Y oranı yaklaşık olarak %4,5 azalmıştır. Yakıtların, farklı H/Y oranına sahip olmalarını nedeni yakıt tüketim değerlerinin farklı olmasından kaynaklanmaktadır.



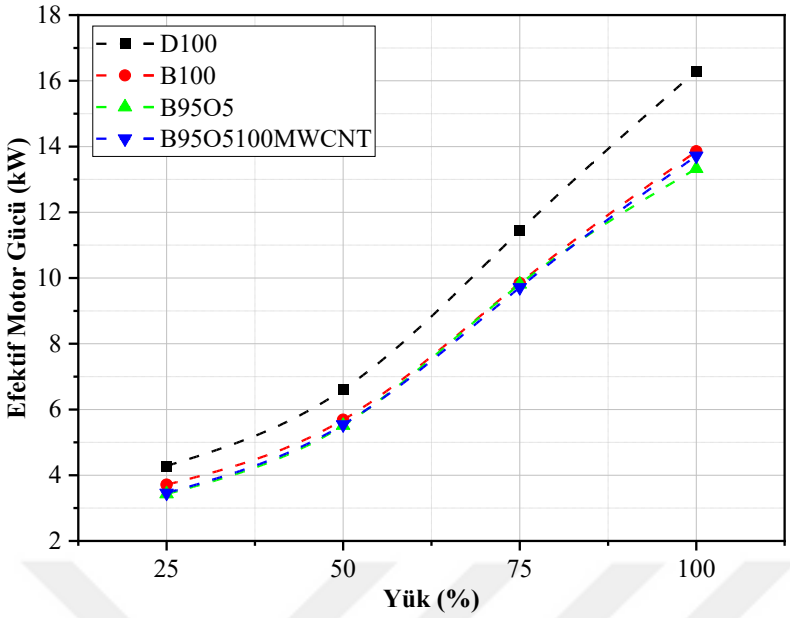
Şekil 8.2. Motor yüküne bağlı hava-yakıt oranının değişimi

8.1.1.3. Efektif motor gücü

Şekil 8.3'te belirli bir gaz konumuna göre motor gücünün farklı yakıt türlerindeki değişimi gösterilmiştir. Tüm yakıt çalışmalarında yük artışıyla birlikte motor gücünde artış gözlemlenmiştir. Örneğin B100'ün %25, %50, %75 ve tam yük şartlarındaki motor gücü sırasıyla, 3,71, 5,69, 9,85 ve 13,86 kW'tır. Bu yükselmenin nedeni, yük artışıyla silindir içerisine daha fazla miktarda yakıtın püskürtülmesidir. Yük, pedal açıklığını ifade ettiğinden dolayı, bütün yakıtlar için, motor yükünün her bir yüzdesinde silindir içerisine hacimsel olarak eşit miktarda yakıt gönderilmektedir. Dolayısıyla, yakıtların ısıl değerlerinin farklı oluşu, aynı yük yüzdesinde farklı güç değerleri sergilemesine neden olmuştur. B100, B95O5 ve B95O5100MWCNT ile elde edilen ortalama motor gücü, D100'e göre sırasıyla %14,3, %16,96 ve %16,05 azalmıştır. B95O5 ve B95O5100MWCNT ile ölçülen efektif motor gücü, B100 ile kıyaslandığında sırasıyla, %3.1 ve %2,6 oranında azalmıştır.

Çalışmada elde edilen maksimum efektif motor gücü, D100 ile tam yük şartlarında 16,3 kW iken, en düşük B95O5 ile %25 yükte 3,42 kW'tır. Tüm yük şartlarında D100 ile elde edilen güç değerlerinin, diğer yakıtlara kıyasla daha yüksek olduğu görülmüştür. Bunun nedeni, D100'ün diğer test yakıtlarından daha yüksek enerji içeriğine sahip olmasıdır (Aslan, 2019). Yakıtların yoğunluklarının yüksek olması, yüzey gerilimini arttırmaktadır (Esteban ve ark., 2012). Yüzey geriliminin yüksek olması yakıt atomizasyonunu olumsuz yönde etkilemektedir. Atomizasyonun kötüleşmesi ise, yanma sürecini olumsuz yönde etkilediğinden motor gücünü düşürmektedir. Efektif motor gücündeki bu azalma, yapılan bazı çalışmalar (Aslan, 2019; Sarıkoç, 2019; Yogaraj ve ark., 2021) ile benzerlik göstermektedir.

B100, B95O5 ve B95O5100MWCNT yakıtlarından elde edilen motor gücünün genellikle birbirine yakın olduğu görülmüştür. Tam yük şartlarında B95O5'in efektif motor gücünün düştüğü belirlenmiştir. Yük artışıyla birlikte silindir içerisine kütlesel olarak daha fazla miktarda alkol alınmaktadır. Motor gücündeki bu düşüşün, alkol yakıtların gizli buharlaşma ısılarının yüksek olması nedeniyle silindir içi sıcaklığını düşürmesinden kaynaklanmaktadır. B95O5'e nanopartikül ilavesi ile efektif güçte bir miktar artış gerçekleştiği gözlemlenmiştir. Katkı maddesi olarak MWCNT'lerin yüksek termal iletkenlik özelliği ve ikincil atomizasyon etkileri nedeniyle, yakıt damlacıklarının hızlı bir şekilde buharlaşmalarına sebep olmaktadır (Basha, 2018). MWCNT'lerin bu özelliği, hava-yakıt karışımının homojenliğine katkı sağlamaktadır. Ayrıca, TG süresini de bir miktar kısaltmaktadır. Homojen hava-yakıt karışımının etkisiyle kısalan TG süresi (Raju ve ark., 2018), yanma sürecini iyileştirmektedir. Bu etkilerin, efektif motor gücünde artış sağladığı düşünülmektedir.



Şekil 8.3. Efektif motor gücünün yüke bağlı değişimi

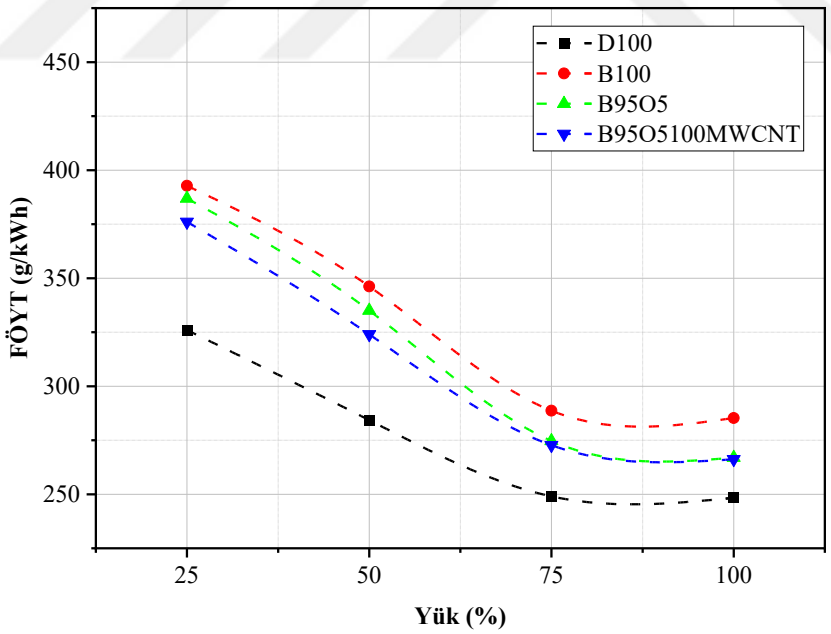
8.1.1.4. Fren özgül yakıt tüketimi

FÖYT birim efektif motor gücü başına tüketilen kütlesel yakıt debisini ifade etmektedir. FÖYT'nin yüke bağlı değişimi Şekil 8.4'te gösterilmiştir. Yük artışıyla birlikte tüm test yakıtların FÖYT değerlerinde azalma kaydedilmiştir. Örnek olarak, B95O5'in %25, %50, %75 ve tam yükteki FÖYT değerleri sırasıyla 386,9, 335,06, 274,66 ve 266,94 g/kWh'tır. Motor yükünün artmasıyla daha fazla yakıt yanma işlemine dahil olmakta ve silindir içi sıcaklıkları yükselmektedir. Yüksek sıcaklıklarda daha verimli yanma reaksiyonu meydana gelmektedir. Böylece, motor gücü başına daha az yakıtın tüketilmesiyle FÖYT azaltılmaktadır (Yaşar, 2016).

B100, B95O5 ve B95O5100MWCNT yakıtlarından elde edilen ortalama FÖYT değerleri, D100'e göre sırasıyla %18,54, %14,07 ve %11,10 oranında arttığı tespit edilmiştir. Bu artışın temel nedeni, B100, B95O5 ve B95O5100MWCNT yakıtlarının oksijen içeriği nedeniyle ısıl değerinin D100 yakıtından daha düşük olmasıdır. D100 ile elde edilen gücü sağlamak için daha fazla miktarda harmanlanmış yakıt gerektiği için FÖYT artar. Bir başka neden ise, biyodizel ile n-oktanolün yüksek viskozitesi ve yoğunluklarının neden olduğu yüzey geriliminin artmasıdır. Yüzey geriliminin artması, atomizasyon kalitesini düşürerek damlacık boyutlarını arttırmaktadır (Tomar ve Kumar,

2020). Bu sonuç, literatür ile uyum içerisindedir (Nutakki ve ark., 2022; Nutakki ve Gugulothu, 2022; Qi ve ark., 2017; Seraç ve ark., 2020).

B95O5 ve B95O5100MWCNT'nin FÖYT değerleri B100 ile karşılaştırıldığında sırasıyla %3,8 ve %2 oranında azalmıştır. B95O5, B100'e göre daha düşük FÖYT değerine sahiptir. B100'e n-oktanol ilavesi B95O5'in yoğunluğunu bir miktar azalttığından, yakıtın daha hızlı buharlaşmasına vesile olmakta ve yakıtın oksidasyonunu hızlandırmaktadır. Bu durumun, FÖYT'nin düşmesinde rol oynayan bir faktör olduğu yorumlanmaktadır (Devarajan ve ark., 2020; Sekar ve ark., 2020). B95O5'e MWCNT ilavesi ile FÖYT azalmıştır. FÖYT değerlerindeki en fazla düşüş MWCNT ilavesi ile gerçekleşmiştir. MWCNT nanopartiküllerin yüksek temas yüzey alanı ve iyi termal iletkenlikleri, yakıtın buharlaşma kabiliyetini hızlandırmaktadır. Boru şeklindeki özel yapısı, harman yakıtın tutuşma özelliklerini ve yanma işlemini iyileştirmektedir. Ayrıca, yakıtın bünyesinde oksijen barındırması yanmayı geliştirmekte ve FÖYT değerlerini azaltmaktadır. Elde edilen sonuçlar MWCNT ile yapılan çalışmalarla benzerlik göstermektedir (Mei ve ark., 2019; Praveen ve ark., 2022; Tomar ve Kumar, 2020).

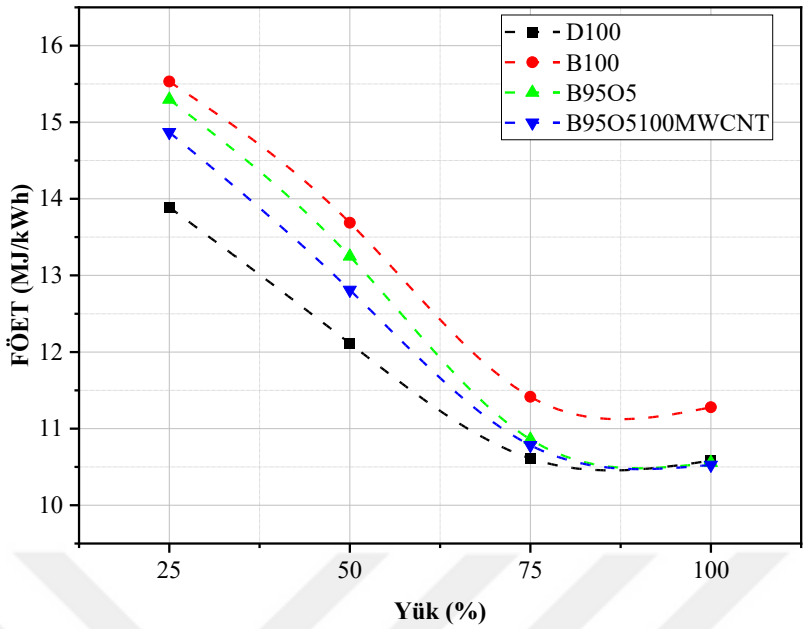


Şekil 8.4. Fren özgül yakıt tüketiminin yüke bağlı değişimi

8.1.1.5. Fren özgül enerji tüketimi

FÖET birim zamanda birim efektif güç başına sarf edilen enerjidir. FÖET, FÖYT ile yakıtın alt ısıl değerinin çarpımına eşittir ve FTV ile ters orantılıdır (Erdoğan, 2019; Srinidhi ve Madhusudhan, 2017). Şekil 8.5'te motor yüküne bağlı olarak FÖET değişimi görülmektedir. Motor yükünün artışıyla birlikte, tüm test yakıtları için FÖET'nin azaldığı belirlenmiştir. Örneğin, D100'ün %25, %50, %75 ve tam yükteki FÖET'si sırasıyla, 13,89, 12,11, 10,61 ve 10,58 MJ/kWh'tır. Silindir içi sıcaklıklarındaki artış, motor yükü ile doğru orantılıdır. Yükün artışıyla birlikte silindir içerisine püskürtülen yakıt miktarı artmaktadır. Yanma işlemine daha fazla miktarda yakıtın dahil olması, silindir içi sıcaklıklarını arttırmaktadır. Ayrıca, yüke bağlı olarak ECU tarafından değiştirilen püskürtme basıncı, yakıt atomizasyonunu iyileştirdiğinden yanma sürecini geliştirmekte ve (Tomar ve Kumar, 2020) FÖET'yi azaltmaktadır.

Maksimum FÖET B100 ile elde edilirken, minimum FÖET D100 ile sağlanmıştır. B100'ün ısıl değerinin D100'e göre düşük olmasının yanı sıra viskozitesinin de yüksek oluşu, FÖET'yi arttırmaktadır (Raju ve ark., 2018). D100 ile kıyaslandığında diğer test yakıtlarının ortalama FÖET değerleri B100 için %10, B95O5 için %5,8 ve B95O5100MWCNT için %3,7 artış göstermiştir. B100 ile kıyaslandığında ise B95O için FÖET %3,8 iken, MWCNT ilavesi ile %5,64 azalma kaydedilmiştir. En yüksek azalma %75 yük şartlarında MWCNT katkılı yakıt ile sağlanmıştır. Biyodizel karışımında MWCNT varlığı, yüksek yüzey alanı/hacim oranı sayesinde yakıtın reaktivitesini artırmaktadır (Basha ve Anand, 2013; Gad ve Jayaraj, 2020). Artan reaktivite ise motor yüküne bağlı olarak yakıtın TG süresini kısaltmaktadır. Ayrıca, MWCNT'nin yanma hızını arttırdığı Chen ve ark. tarafından yapılan çalışmada bildirilmiştir (Chen ve ark., 2018). Bu etkiler, FÖET değerlerinde azalmaya sebep olmuştur.



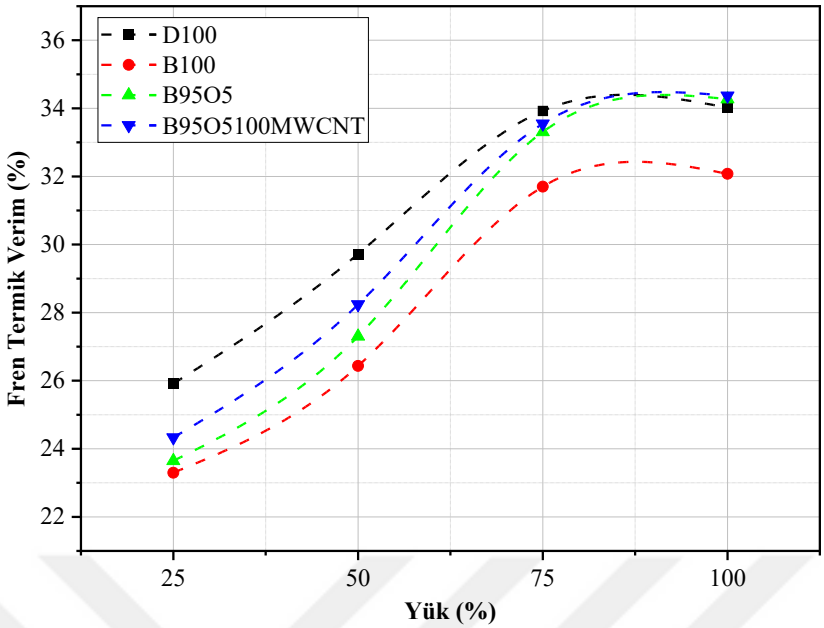
Şekil 8.5. Motor yüküne bağlı fren özgül enerji tüketimi

8.1.1.6. Fren termik verim

FTV motora sürülen yakıtın kimyasal enerjisinin ne kadarının faydalı işe dönüştürüldüğünün göstergesi olarak ifade edilmektedir. FTV, güç, yakıtın ısıl değeri ve yakıtın kütlesel debisi ile ilişkilidir. Farklı türdeki yakıt ve yakıt harmanlarında motor performansının mukayesesinde önemli bir parametredir (Alptekin, 2013; Atabani ve Kulthoom, 2020; Sayın, 2010; Sithard ve Kumar, 2020; Yaşar, 2016).

Şekil 8.6'da motor yüküne bağlı olarak FTV değişimi görülmektedir. Motor yükünün artışıyla birlikte tüm yakıt çalışmalarında FTV'nin yükseldiği gözlemlenmiştir. Örnek olarak, B95O5100MWCNT'nin %25, %50, %75 ve tam yükteki FTV değerleri sırasıyla %24,33, %28,24, %33,55 ve %34,36'dir. FTV'deki bu yükselme, artan motor yükü ile birlikte, silindir içerisine daha fazla yakıtın püskürtülmesiyle, enerji salınımının artmasından kaynaklanmaktadır (Rangabashiam ve ark., 2019; Tomar ve Kumar, 2020). Buna ilaveten, azalan FÖYT, FTV'deki artışın muhtemel bir başka nedenidir (Alptekin, 2013; Çakmak, 2021). Tam yük koşullarında tüm yakıt çalışmalarında FTV'de düşüş yaşanmıştır. Bu düşüşün olası sebebi, yanma verimindeki azalma ve artan FÖYT olduğu değerlendirilmektedir (Koncuk, 2008).

B100 ve karışım yakıtların FTV'si, D100 yakıtına kıyasla daha düşüktür. Maksimum FTV %34,36 ile tam yükte B95O5100MWCNT ile elde edilmiştir. Minimum FTV ise %23,3 ile %25 yükte B100 ile elde edilmiştir. D100 ile karşılaştırıldığında B100, B95O5 ve B95O5100MWCNT'de ortalama FTV sırasıyla %8,15, %4,08 ve %2,5 azalmıştır. B100'ün enerji içeriğinin düşük olması ve yüksek FÖYT değeri, FTV'nin düşmesindeki temel neden olarak yorumlanmıştır. B95O5 ve MWCNT ilaveli yakıt karışımı B100 ile karşılaştırıldığında FTV değerlerindeki değişim sırasıyla %4,42 ve %6,15 artmıştır. B100'e n-oktanol ilavesi, karışım yakıtın buharlaşma yeteneğini arttırması nedeniyle yüksek oranda sabit hacimli yanma meydana gelmesi, FTV üzerinde olumlu etki sağlamıştır (Devarajan ve ark., 2020; Qi ve ark., 2017). Karışım yakıta MWCNT ilavesi B100 ve B95O5 yakıtına kıyasla daha düşük FÖYT sergilemektedir. MWCNT'nin yüksek termal iletkenliği, yakıtın buharlaşmasına katkı sağlamaktadır. MWCNT ve n-oktanolün birleşik etkisiyle, yakıtın hızlı buharlaşması, aynı zamanda, karışım yakıtın bünyesinde oksijen ihtiva etmesi, artan yanma verimi etkisiyle daha yüksek FTV sağlamaktadır. Artan yük ile birlikte silindir içi sıcaklıklarının yükselmesiyle, B95O5100MWCNT çalışmasında daha iyi hava-yakıt karışımı sağlanmaktadır. Yanma sırasında alevin tüpler, katmanlar ve delikler gibi dar boşluklardan yayılmaya meyilli olması, MWCNT'nin bu özel yapısı sayesinde alev yayılımını hızlandırma ve yanma periyodunun gelişmesine katkı sağlamaktadır. Bunun sonucu olarak, FÖYT'deki azalma, güç artışından daha etkin rol oynadığından, FTV'deki artışın bir başka nedenidir. Nanopartiküllerin FTV üzerindeki bu etkileri literatür ile benzerlik göstermektedir (Mei ve ark., 2019; Praveen ve ark., 2022).



Şekil 8.6. Motor yüküne bağlı FTV'nin değişimi

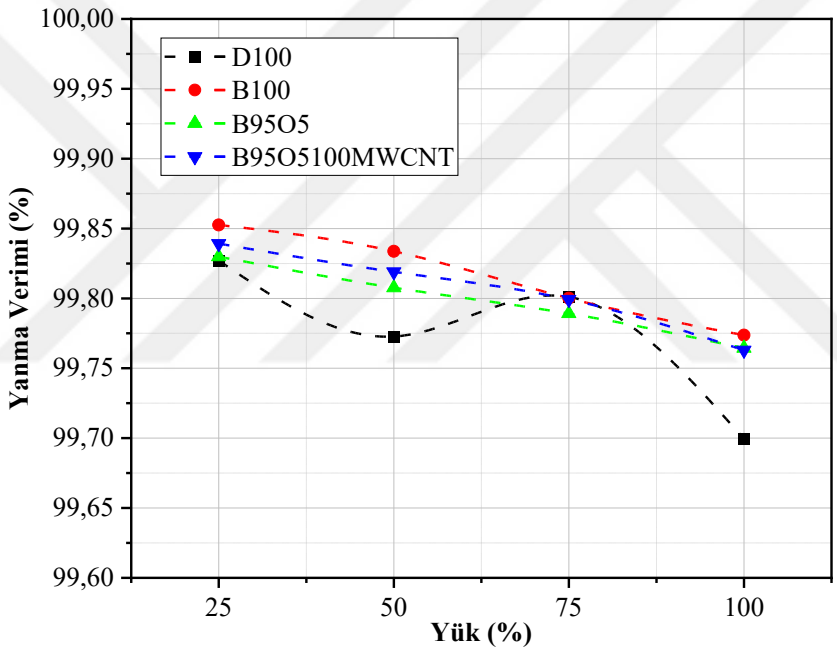
8.1.1.7. Yanma verimi

Tam yanma reaksiyonu sonucunda meydana gelen ürünlerin oluşum entalpilerinin toplamı yakıtın ısıl değerine eşittir. Yanma işlemi sonucunda eksik yanma ürünleri meydana geldiğinde, yakıtın tüm enerjisi açığa çıkmamaktadır. Egzoz emisyonlarında HC, CO ve NO gibi bileşiklerin konsantrasyonlarındaki artış yanma verimini düşürmektedir (Putrasari ve Lim, 2017). Yakıtın alt ısıl değeri ile yanma reaksiyonu sonunda açığa çıkmayan enerji farkının, yakıtın alt ısıl değerine oranı yanma verimi olarak tanımlanmaktadır.

Şekil 8.7'de, motor yüküne bağlı yanma verimi gösterilmiştir. Deney motorunun püskürtme basıncının yüksek olması, genel olarak tüm test yakıtları için yüksek yanma verimi sağlamıştır. Yük miktarı arttıkça tüm test yakıtları için yanma veriminin azaldığı belirlenmiştir. Artan yük ile birlikte, silindir içerisine daha fazla yakıt püskürtülmektedir. Düşük yüklere kıyasla, yüksek yüklerde püskürtülen yakıtın daha fazla HC ve NO oluşturması yanma verimini düşürmektedir.

Yanma verimindeki ortalama yüzde değişimler D100 ile karşılaştırıldığında, B100 için %0,04, B95O5 için %0,02 ve B95O5100MCNT için %0,03 artış kaydedilmiştir. En yüksek yanma verimi %99,85 ile B100 ile elde edilmiştir. En düşük yanma verimi ise

D100 ile yaklaşık %99,70'tir. Yanma verimi, D100 ile çalışmada kararsız olurken, diğer test yakıtlarında nispeten daha lineer bir azalma göstermiştir. D100'deki bu değişim ölçüm hatası sınırları içerisinde olduğu için göz ardı edilebilir. B95O5 yakıt karışımının yanma verimi B100'e göre %0,01 azalırken, MWCNT ilaveli yakıtta %0,009 azalmıştır. B100 ve B95O5'in oksijen içeriği yanma performansını iyileştirdiğinden dolayı D100'e göre yanma verimi daha yüksektir (Nabi ve ark., 2019). B95O5'in yanma verimi, MWCNT katkısı ile bir miktar attırılmaktadır. Muhtemelen, nanopartiküllerin yüksek yüzey alanı/hacim oranının etkisiyle artan ısı iletkenliği, yakıtın daha hızlı buharlaşmasını ve homojen karışım oluşumunu sağlamaktadır (Sürer, 2020). Homojen karışım sayesinde yakıt, daha fazla oksijenle yanma sürecine iştirak ettiği için yanma verimi yükselmiştir.



Şekil 8.7. Motor yüküne bağlı yanma verimi

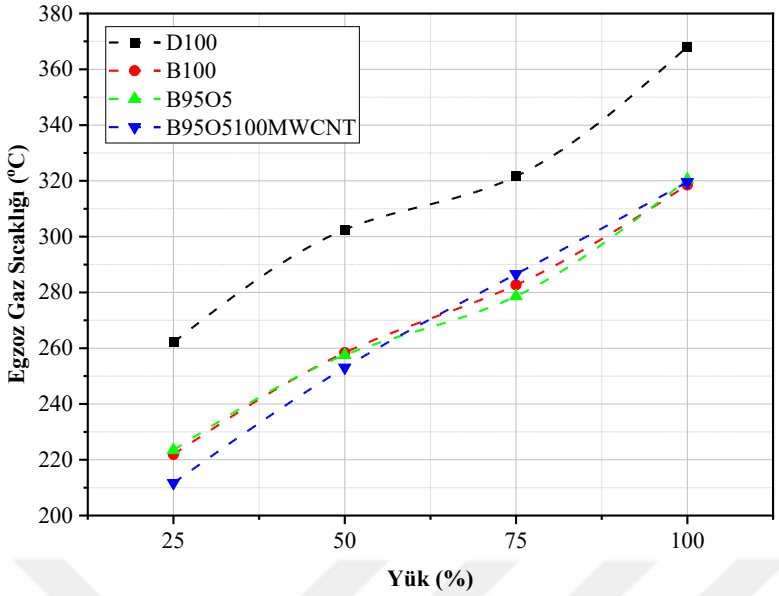
8.1.1.8. Egzoz gaz sıcaklığı

EGS, yanma sonunda meydana gelen silindir içi sıcaklığın bir göstergesi olduğundan motor performansı açısından önemli bir parametredir (Kumar ve ark., 2016). Şekil 8.8'de motor yüküne bağlı EGS görülmektedir. Motor yükünün artmasıyla tüm test yakıtlar için EGS artış göstermiştir. Örnek olarak, B100'ün %25, %50, %75 ve tam yükteki EGS değerleri sırasıyla 221,87 ºC, 258,40 ºC, 252,67 ºC ve 318,54 ºC'dir. EGS'deki bu artışın ana nedeni, yük artışıyla silindir içerisine daha fazla miktarda yakıtın püskürtülerek

yakılmasıdır (Gad ve ark., 2020; Gad ve Jayaraj, 2020). EGS'deki bu artışın bir başka sebebi ise, hava/yakıt oranındaki azalmayla, havanın soğutma etkisinin azalmasından kaynaklanmaktadır (Özsezen, 2007).

Tüm yük koşullarında en yüksek EGS değerleri D100 ile ölçülmüştür. Maksimum EGS, tam yükte 368,11 ºC ile D100 çalışmasında elde edilmiştir. En düşük EGS ise %25 yükte 211,69 ºC ile B95O5100MWCNT'de elde edilmiştir. D100 ile karşılaştırıldığında, B100, B95O5 ve B95O5100MWCNT'de ölçülen EGS'deki ortalama düşüşler sırasıyla %13,78, %13,89 ve %14,63'tür. Biyodizel ve n-oktanol yakıtların oksijen içeriği hava/yakıt oranını arttırmaktadır. Ayrıca, bu yakıtların alt ısıl değerinin D100'e göre daha düşük olması, EGS değerlerini azaltmaktadır (El-Seesy ve ark., 2021a). Ayrıca, yanma sürecinin daha erken sona ermesi, EGS'deki azalmanın bir başka muhtemel nedenidir. Elde edilen bulgular, yapılan diğer çalışmalar ile benzerlik göstermektedir (Demir, 2009; Erdoğan, 2019; Heyadari-Maleney ve ark., 2017).

B95O5 ve MWCNT ilaveli yakıt karışımlarının EGS'leri B100 ile kıyaslandığında sırasıyla %0,1 ve %1 azalmıştır. B100'e n-oktanol ilavesi, karışım yakıtın ısıl değerinde önemli bir değişiklik gerçekleştirmemektedir. Ancak, n-oktanolün yüksek gizli buharlaşma ısısı, silindir içerisinde soğutma etkisi yarattığından, ortalamada B100'e kıyasla EGS bir miktar azalmıştır (Kumar ve ark., 2016). Karışım yakıta nanopartikül eklenmesi, düşük yüklerde EGS'yi azaltmıştır. MWCNT, yakıt/hava karışımının homojenliğini desteklediğinden yanma hızını da arttırmaktadır. Ayrıca, kontrollü yanma safhasında meydana gelen zengin karışım bölgelerinin azalması, EGS'yi azaltan bir diğer faktördür (El-Seesy ve Hassan, 2019).



Şekil 8.8. Egzoz gaz sıcaklığının yüke bağlı değişimi

8.1.2. Yanma karakteristikleri

Yanma karakteristikleri, yakıtın yanma sürecinde krank mili açısına bağlı olarak silindir içi basıncında meydana gelen değişiklikleri, yanmanın aşamaları ve ısı dağılımı ile ilgili bilgiler sağlamaktadır. Bu bölümde D100, B100, B95O5 ve B95O5100MWCNT yakıtlarının krank açısına bağlı silindir gaz basıncı ve ısı dağılımı karşılaştırmalı olarak tartışılmıştır.

8.1.2.1. Silindir içi gaz basıncı

Yanma kabiliyetini karakterize eden parametrelerin başında silindir gaz basıncı gelmektedir. Silindir gaz basıncı motor yüküne, motor devrine, TG süresine, püskürtülen yakıtın miktarına, ısıl değerine, setan sayısına, yakıtın viskozitesine, yoğunluğuna, püskürtme stratejisine ve yakıtın atomizasyonuna bağlıdır. Dizel motorlarda maksimum silindir içi gaz basıncı, ani yanma periyodunda, yanmış yakıt miktarına ve yanma hızına bağlıdır. Ön karışımlı yanma safhası TG süresi, püskürtme karakteristikleri ile kontrol edilmektedir. TG periyodu, püskürtme özellikleri ve karışım oluşumunu etkileyen yakıt kaynaklı çeşitli özelliklerden etkilenmektedir. Yakıtların setan sayısı, viskozitesi ve yoğunluğu TG süresi üzerinde etkili bir faktördür. TG süresinin uzaması, ani yanma safhasında silindirde daha fazla yakıt birikimine neden olmakta bunun sonucunda ise

yanma hızı artmaktadır. Bu minvalde, yakıtın uçuculuğu ve viskozitesi ön karışımı arttırmada etkili bir role sahiptir. Ayrıca, yüksek alkollerin karbon zincir uzunluğunun fazla olması, yanma hızını arttırmaktadır (Erdoğan ve ark., 2020; Kumar ve ark., 2016; Prasad ve ark., 2020; Sarıkoç, 2019).

Şekil 8.9, 8.10, 8.11 ve 8.12'de sırasıyla %25, %50, %75 ve %100 yük şartlarındaki test yakıtlarının sabit hızda KMA'ya bağlı olarak silindir gaz basıncı değişimi gösterilmiştir. Yük arttıkça tüm test yakıtlarının silindir gaz basınçları artmıştır. Örneğin, D100'ün %25, %50, %75 ve tam yük şartlarındaki maksimum silindir gaz basıncı sırasıyla 88,08 bar, 110,31 bar, 168,60 bar ve 220,04 bar olarak ölçülmüştür Silindir içerisine birim zamanda püskürtülen yakıt miktarı arttığından dolayı, maksimum silindir gaz basıncı artmaktadır (Sayın ve ark., 2012). Tüm yük şartlarında D100'ün maksimum silindir içi gaz basıncının diğer test yakıtlarından daha yüksek olduğu görülmüştür. CRDI motor, D100 yakıt özelliklerine göre ayarlanmış basınç ve avans haritalarına göre çalışmaktadır. Püskürtme basınç ve avansı, motorun farklı hız ve yük şartlarına göre ECU tarafından ayarlanmaktadır. Ayrıca, D100'ün ısıl değerinin yüksek olması, diğer karışım yakıtlardan daha yüksek maksimum silindir gaz basıncı sergilemesine katkı sağlamıştır (Prasad ve ark., 2020).

Şekil 8.9'da tüm test yakıtlarının %25 yükte ve sabit hızda, KMA'ya bağlı olarak silindir içi gaz basıncının değişimi görülmektedir. D100'ün maksimum silindir gaz basıncı, 88,08 bar ölçülürken, B100'ün 87,09 bar, B95O5'in 86,61 bar, B95O5100MWCNT'nin ise 86,60 bar ölçülmüştür. Maksimum silindir gaz basınçlarının konumu incelendiğinde, D100 için ÜÖN'den sonra 8 KMA iken, diğer test yakıtlarında ÜÖN'den sonra 7 KMA'da ölçülmüştür. B100 ve karışımlarının maksimum silindir gaz basıncının D100'e göre daha düşüktür. Bunun nedeni, B100 ve karışımlarının D100'e göre daha düşük ısıl değeridir. Ayrıca, B100'ün viskozite ve yoğunluğunun yüksek, uçuculuğunun düşük olması yakıt damlacıklarının daha büyük boyutlu olmasına neden olmaktadır. Bu durum, yakıtın atomizasyon kalitesini olumsuz yönde etkileyerek hava-yakıt karışımını kötüleştirmektedir. Literatürde benzer sonuçlara rastlanmıştır (Nutakki ve ark., 2022; Tomar ve Kumar, 2020). B100'e n-oktanol ilavesi ile silindir gaz basıncının bir miktar daha düştüğü görülmektedir. n-oktanolün viskozitesi B100'den daha yüksektir. Yüksek viskozitenin yakıt atomizasyonunu kötüleştirmesi ve %25 yük şartlarında silindir içi sıcaklıklarının düşük olması nedeniyle, yakıtın buharlaşması zorlaşmakta ve silindir gaz

basıncı düşmektedir. Test yakıtına MWCNT ilavesi, nanopartiküllerin yüzey alanı/hacim oranının yüksek olmasının bir sonucu olarak, yakıt damlacıklarının ısı transferini destekleyerek karışım yakıtın termal iletkenliğini arttırmaktadır. Bu etki, yakıt damlacığında mikro patlama oluşturarak daha küçük zerrelere ayrılmasına ve hızlı bir şekilde buharlaşmasına yardımcı olmaktadır. Sonuçlar, literatür ile benzerlik göstermektedir (El-Seesy ve Hassan, 2019).

Şekil 8.10'da %50 yük şartlarında ve sabit hızda tüm test yakıtlarının KMA'ya bağlı olarak silindir gaz basıncının değişimi gösterilmiştir. D100'ün maksimum silindir gaz basıncı 110,31 bar iken, B100 105,83 bar, B95O5 106,22 bar ve B95O5100MWCNT 104,99 bar olarak ölçülmüştür. %50 yükte, maksimum silindir gaz basınçlarının konumu %25 yüke kıyasla ÜÖN'ye daha yakın olduğu gözlemlenmiştir. Bu durum, yakıt atomizasyonunun iyileştiğini işaret etmektedir (Sayın ve ark., 2012). D100, B100 ve B95O5100MWCNT'nin maksimum silindir gaz basınçlarının konumu ÜÖN'den sonra 7 KMA iken, B95O5 için 6 KMA'dır. B95O5, B100 ve B95O5100MWCNT'den daha yüksek silindir gaz basıncı sergilemiştir. %50 yük şartlarında artan silindir içi sıcaklıkları, B95O5'in daha hızlı buharlaşmasına katkı sağladığı düşünülmektedir. Ancak, B100'ün yüksek yoğunluğu, yakıtın atomizasyonu üzerinde olumsuz etkisi nedeniyle silindir gaz basıncı azalmıştır. Yakıt karışımına eklenen MWCNT, nano yakıtın yanma hızını arttırmaktadır. Artan yanma hızı silindir gaz basıncının düşmesine neden olmaktadır. Literatür incelendiğinde benzer sonuçların elde edildiği görülmektedir (El-Seesy ve Hassan, 2019).

Şekil 8.11'de %75 yük şartlarında ve sabit hızda test yakıtlarının KMA'ya bağlı olarak silindir içi gaz basıncının değişimi gösterilmiştir. D100 ile elde edilen maksimum silindir gaz basıncı 168,60 bar iken, B100'de 156,44 bar, B95O5'de 159,36 bar ve B95O5100MWCNT'de 158,09 bar olarak ölçülmüştür. Maksimum silindir gaz basınçlarının oluştuğu konumlar incelendiğinde D100, B95O5 ve B95O5100MWCNT'de 7 KMA iken B100'de 8 KMA'dır. B100 ile en düşük silindir içi gaz basıncı ölçülmüştür. n-oktanol ilaveli biyodizelin, silindir içi sıcaklıklarının etkisiyle daha hızlı buharlaştığı ve gelişen atomizasyon ile birlikte daha yüksek silindir gaz basıncı sergilediği söylenebilir. MWCNT'ler yüksek yüzey alanı/hacim oranına sahip olması itibariyle yakıt damlacıklarının ısı iletkenliğini arttırmaktadır. Ayrıca, ikincil atomizasyon ile yakıt damlacık boyutları küçülür. %75 yük şartlarında artan silindir içi

sıcaklıklarının da etkisiyle, yakıt damlacıklarına olan ısı transferi artmakta ve daha homojen hava-yakıt karışımı oluşmaktadır. Bu etkiler, silindir gaz basıncının artışına neden olmuştur.

Şekil 8.12'de tam yük şartlarında ve sabit hızda test yakıtlarının KMA'ya bağlı olarak silindir gaz basıncının değişimi verilmiştir. Tam yükte maksimum silindir içi gaz basıncı D100, B100, B95O5 ve B95O5100MWCNT için sırasıyla 220,04 bar, 212,35 bar, 215,39 bar ve 214,59 bar ölçülmüştür. Maksimum silindir gaz basınçlarının konumları incelendiğinde D100, B100 ve B95O5 için 8 KMA iken B95O5100MWCNT için 7 KMA'dır. Motor en düşük özgül yakıt tüketimini, maksimum silindir gaz basıncının 6-10 KMA'da oluştuğu konumda sağlamaktadır (Erdoğan, 2019). Bu deneysel çalışmada, tüm yakıtlar 6 ile 10 KMA arasında maksimum silindir gaz basıncı sergilemiştir. B100, diğer test yakıtlarına kıyasla en düşük maksimum silindir içi basıncı değerine sahiptir. Silindir içi basıncı düşüren faktörler, B100'ün düşük ısıl değeri ve yüksek yoğunluğudur. B95O5, B95O5100MWCNT'den biraz daha yüksek silindir gaz basıncı sergilemiştir. Bunun nedeni, B95O5'in ısıl değerinin B100'den bir miktar daha yüksek olmasıdır. Bununla birlikte, MWCNT katkılı yakıtın maksimum silindir içi gaz basıncı, B100'den daha yüksektir ve tepe noktası, ÜÖN'ye 1 derece daha yaklaşmıştır. ÜÖN'ye yakın maksimum silindir içi gaz basıncı, iyileştirilmiş atomizasyon ve hava-yakıt karışımının göstergesidir (Sayın ve ark., 2012). MWCNT'nin fiziksel özelliklerinin, katalitik etkilerinin ve ısı transfer özelliklerinin iyileştirilmesi gibi olgular, silindir içi gaz basıncının iyileşmesine katkı sağlamıştır. Bu özellik, silindirdeki tüm yakıtın yanma sürecine katılımını desteklemektedir.

8.1.2.2. Isı dağılımı

Isı dağılımı, KMA'ya bağlı olarak yakıtın yanma işlemi sonrasında kimyasal enerjisinin ısı enerjisi olarak ortaya çıkarmasıdır. Isı dağılımı, çeşitli parametrelerden etkilenmektedir. Isıl değer, viskozite, yoğunluk, uçuculuk ve setan sayısı gibi yakıtın fiziksel ve kimyasal özelliklerinin yanı sıra motorun püskürtme stratejileri gibi yapısal parametreler de ısı dağılımını etkilemektedir. Isı dağılımı, TG süresi, yanma hızı ve açığa çıkan ısı enerjisinin hangi yanma safhalarında meydana geldiği konusunda önemli bilgiler içermektedir. Dizel motorlarda TG, yakıtın püskürtülmesi ile yanma olayının başlamasına kadar geçen süredir. Yakıtların fiziksel ve kimyasal özellikleri TG süresini

etkilemektedir. Yakıtın viskozitesinin ve yoğunluğunun düşük, setan sayısının yüksek olmasının TG süresini kısalttığı belirtilmektedir (Chaudhari ve ark., 2021; Kumar ve ark., 2020; Prasad ve ark., 2020; Rangabashiam ve ark., 2019; Sathiyamoorthi ve ark., 2017).

Şekil 8.9, 8.10, 8.11 ve 8.12'de sırasıyla %25, %50, %75 ve tam yükte test yakıtlarının KMA'ya bağlı olarak ısı dağılımı gösterilmiştir. Yük arttıkça tüm test yakıtlarının ısı dağılımında yükselme gözlemlenmiştir. Bunun nedeni, yük artışıyla silindir içerisine daha fazla yakıtın alınmasıdır. Tüm yük şartlarında D100'ün TG süresinin diğer test yakıtlarına göre daha kısa olduğu tespit edilmiştir. D100'ün düşük viskozite ve yoğunluğu, TG süresini kısaltan bir etkiye sahiptir. Ayrıca, CRDI motorun püskürtme stratejilerinin, D100 yakıt özelliklerine göre ayarlanmış olması, TG süresinin kısaltmıştır.

Şekil 8.9'da %25 yükte ve 1500 d/d sabit hızda KMA'ya bağlı olarak ısı dağılımı gösterilmiştir. D100'den sonra en kısa TG, B100 ile elde edilmiştir. B95O5 ile B95O5100WMCNT'nin TG süresi hemen hemen aynı KMA'ya rastlamaktadır. Yakıt özellikleri incelendiğinde, D100 ve test yakıtlarının setan sayıları arasında önemli bir fark görülmemektedir. Ancak, D100 haricindeki test yakıtlarının yüksek viskozite ve yoğunlukları, setan sayısından daha baskın bir role sahip olması sebebiyle TG süresini uzatmıştır. B95O5 ve B95O5100WMCNT, B100'den daha uzun TG süresine sahiptir. TG süresindeki uzama, silindir içi sıcaklıklarının düşük olması ve n-oktanolün B100'den daha yüksek viskozitesinden dolayı kaynaklanmaktadır. Yakıt karışımına MWCNT ilavesinin %25 yük şartlarında TG süresine önemli bir etkisi olmadığı belirlenmiştir. Muhtemelen, püskürtme işleminin başlarında, düşük silindir içi sıcaklıkları nedeniyle buharlaşmanın yetersiz olmasından kaynaklanmaktadır.

Maksimum ısı dağılımı B95O5100WMCNT ile elde edilirken, en düşük D100 ile elde edilmiştir. Maksimum ısı dağılımı D100 için 57,41 J/^{o}, B100 için 64,69 J/^{o}, B95O5 için 66,01 J/^{o} ve B95O5100WMCNT için 72,22 J/^{o} olarak hesaplanmıştır. Maksimum ısı dağılımının konumu D100 için -5 KMA iken B100, B95O5 ve B95O5100WMCNT için -4 KMA'dır. D100'ün ısı dağılımının diğer test yakıtlarına göre düşük olması, %25 yük şartlarındaki düşük yanma hızından kaynaklanmaktadır. B100 ve B95O5'in bezer ısı dağılımı sergiledikleri tespit edilmiştir. MWCNT'lerin yüksek yüzey alanı/hacim oranları, yakıtın termal iletkenliğini arttırmaktadır. Yakıt püskürtüldükten sonra meydana gelen atomizasyon sonrası, MWCNT'lerin yakıt damlacıklarında meydana getirdiği

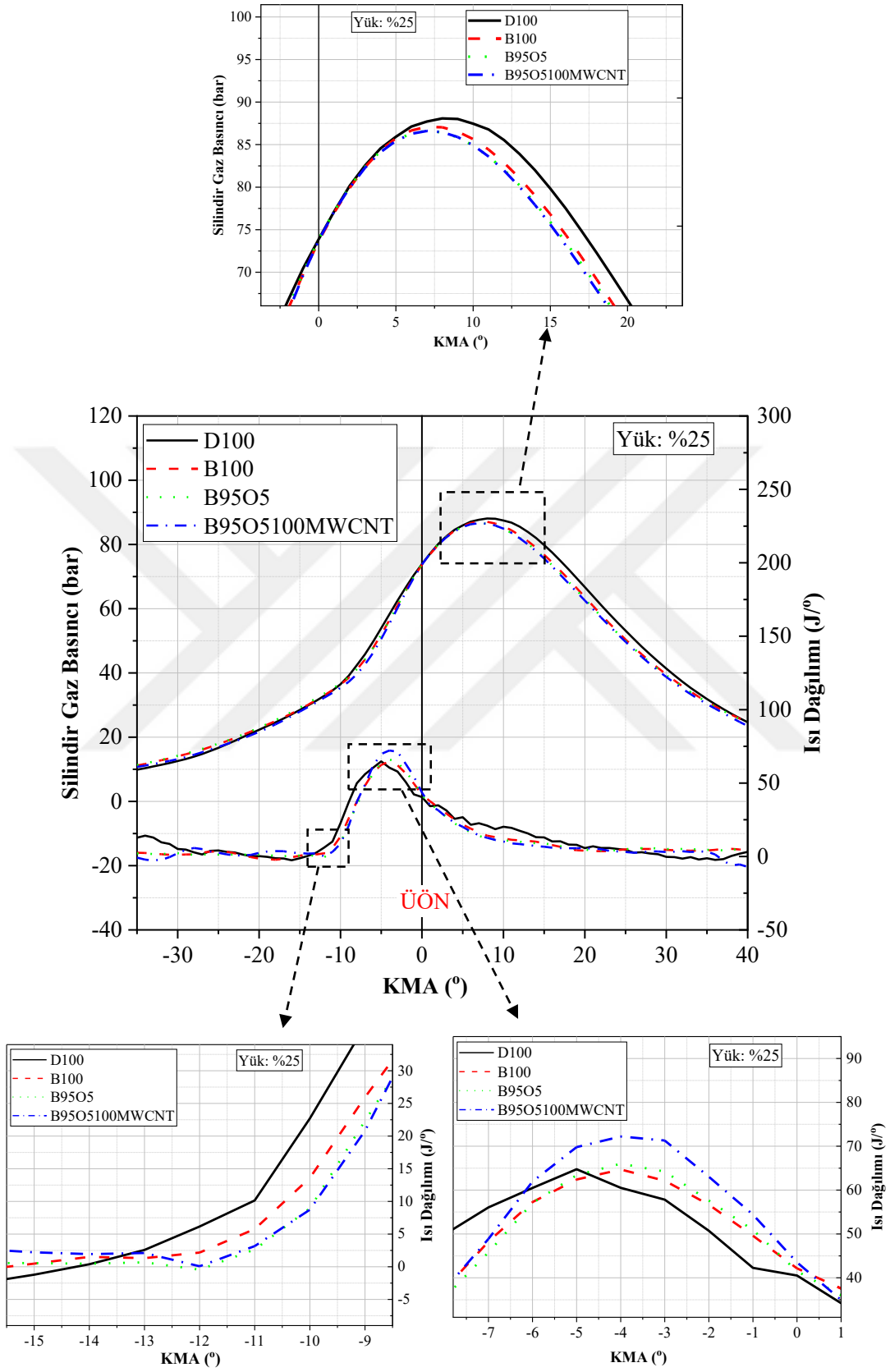
mikro patlama etkileri, ikincil bir atomizasyon oluşturarak damlacık boyutlarının azalmasına ve yakıtın buharlaşma hızının artmasına sebep olmaktadır (Ettefaghi ve ark., 2018). Bu etkiler, nano yakıtın yanma hızının artmasına ve ısı dağılımının yükselmesine neden olmaktadır. Literatürde benzer sonuçlara rastlamıştır (Najafi, 2018).

Şekil 8.10'da %50 yükte ve 1500 d/d sabit hızda, KMA'ya bağlı olarak ısı dağılımı gösterilmiştir. Artan yük ile birlikte silindir içi sıcaklıklarının yükseltmesi, MWCNT katkılı yakıtın TG süresinin B95O5'e göre daha kısa olmasına neden olmuştur. Maksimum ısı dağılımı incelendiğinde, D100 için 78,8 J/º, B100 için 75,93 J/º, B95O5 için 88,65 J/º ve B95O5100MWCNT için 75,72 J/º olarak hesaplanmıştır. Maksimum ısı dağılımının konumları incelendiğinde, D100, B100 ve B95O5100MWCNT -5 KMA iken, B95O5 için -4 KMA'dır. En yüksek ısı dağılımı B95O5 ile elde edilirken, en düşük ısı dağılımı B95O5100MWCNT'de oluşmuştur. B95O5'in TG süresinin diğer test yakıtlarından daha uzun olması, ön karışımlı yanma safhasında daha fazla yanmamış yakıt birikimine neden olmuştur. Bu safhada, yanma hızının artışı sonucunda ısı dağılımının tepe değeri artmıştır. Elde edilen bulgular literatürle uyum içesindedir (Kumar ve ark., 2016). B100 ve B95O5100MWCNT benzer ısı dağılımı sergilemişlerdir. Bunun muhtemel nedeni, TG sürelerinin benzer olmasıdır.

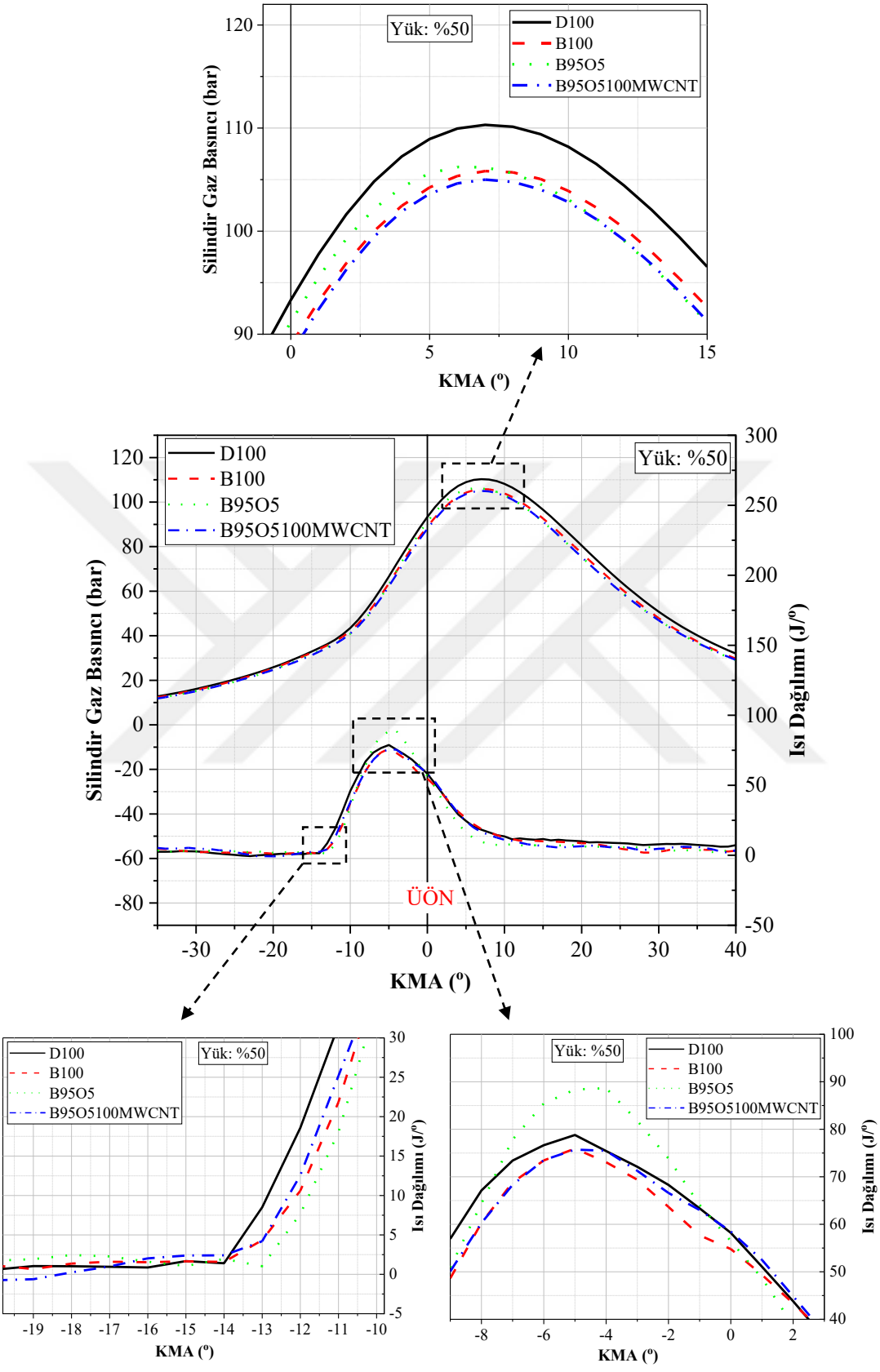
Şekil 8.11'de %75 yükte ve 1500 d/d sabit hızda, KMA'ya bağlı olarak ısı dağılımı gösterilmiştir. B95O5 ve B95O5100WMCNT, B100'den daha kısa TG süresine sahiptir. B95O5 ile B95O5100WMCNT'nin TG süresi hemen hemen aynı KMA'ya rastlamaktadır. %75 yükte silindir içi sıcaklıklarının yükselmesi ve püskürtme stratejilerinin n-oktanolün buharlaşmasına katkı sağlamasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Maksimum ısı dağılım incelendiğinde, D100 için 98,78 J/º, B100 için 88,98 J/º, B95O5 için 92,38 J/º ve B95O5100MWCNT için 91,84 J/º olarak hesaplanmıştır. Tüm test yakıtları için maksimum ısı dağılımı -2 KMA'da gerçekleşmiştir. Maksimum ısı dağılımı D100 ile elde edilirken, minimum B100 ile elde edilmiştir. CRDI motorun püskürtme stratejisi ve püskürtme avansının D100 için programlanmış olması nedeniyle %75 yük şartlarında maksimum ısı dağılımı meydana gelmiştir. Ayrıca, D100'ün TG süresinin diğer test yakıtlarından daha kısa olması, geliştirilmiş yanma süreci ve yüksek ısıl değer, ısı dağılımının yükselmesine yardımcı olan bir başka faktördür. B100'ün yüksek viskozite ve yoğunluğu, TG süresini az da olsa arttırmıştır. Ancak, B100'ün ısıl değerinin düşük olması, maksimum ısı dağılımının

azalmasıyla sonuçlanmıştır. Test yakıtları arasında D100'e en yakın ısı dağılımı, B95O5 ile meydana gelmiştir. B95O5'in TG süresinin B100 ve B95O5100MWCNT'den bir miktar daha kısa olduğu tespit edilmiştir. Bu nedenle, ısı dağılımı D100'e daha yakındır. B95O5100MWCNT yakıtı ile çalışmada, B100'e göre daha yüksek ısı dağılımı meydana gelmiştir.

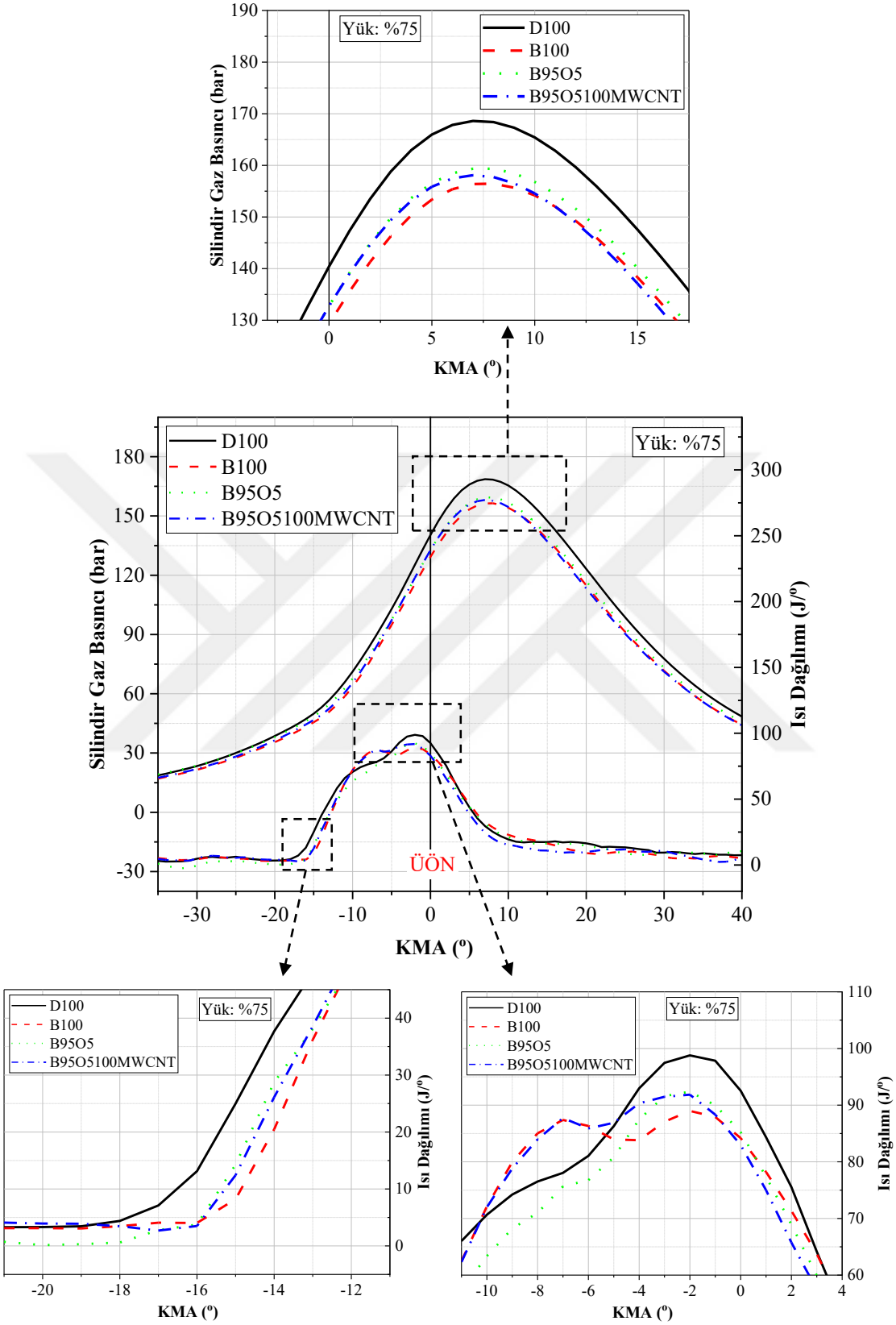
Şekil 8.12'de tam yükte ve 1500 d/d sabit hızda, KMA'ya bağlı olarak ısı dağılımı gösterilmiştir. B100, B95O5 ve B95O5100MWCNT'nin yakıt özelliklerinin (viskozite, yoğunluk vb.) birbirine yakın olması, TG süresinin de birbirlerine çok yakın olmasına sebep olmuştur (El-Seesy ve Hassan, 2019). Maksimum ısı dağılımı incelendiğinde, D100 için 127,54 J/^{o}, B100 için 120,19 J/^{o}, B95O5 için 119,82 J/^{o} ve B95O5100MWCNT için 118,11 J/^{o} olarak hesaplanmıştır. Maksimum ısı dağılımının oluştuğu konumlar incelendiğinde, D100 için -5 KMA iken, B100, B95O5 ve B95O5100MWCNT için -4 KMA'dır. Maksimum ısı dağılımı D100 ile elde edilirken, en düşük B95O5100MWCNT ile elde edilmiştir. D100'ün yüksek ısıl değer, düşük viskozite ve yoğunluk gibi özelliklerinin maksimum ısı dağılımı sağlamıştır. B100, B95O5 ve B95O5100MWCNT'nin yüksek viskozitesi ve yoğunluğundan dolayı zayıf atomizasyonu, TG süresinin uzamasına neden olmuştur (Söyler ve ark., 2021). Bu durum, diğer test yakıtlarından elde edilen maksimum ısı dağılımının D100'den daha düşük olmasına neden olmuştur. Bu çalışma şartlarında, MWCNT'nin ısı dağılımında bir iyileşme sağlamadığı tespit edilmiştir.



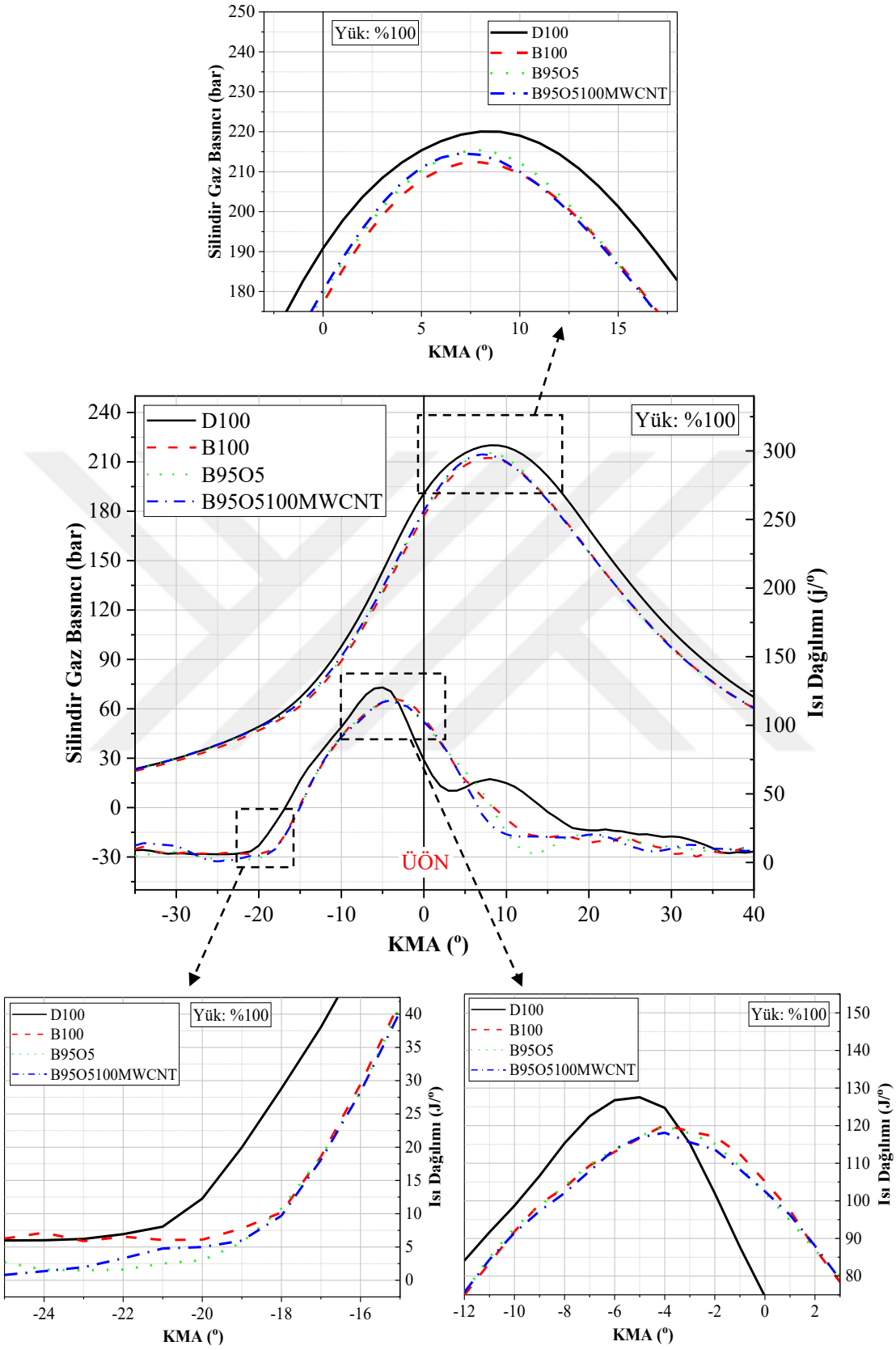
Şekil 8.9. %25 yükte silindir gaz basıncı ve ısı dağılımı



Şekil 8.10. %50 yükte silindir gaz basıncı ve ısı dağılımı



Şekil 8.11. %75 yükte silindir gaz basıncı ve ısı dağılımı



Şekil 8.12. Tam yükte silindir gaz basıncı ve ısı dağılımı

8.1.3. Egzoz emisyonları

Egzoz ölçüm cihazı ile HC ve NO emisyonları ppm olarak, CO_2 ise % olarak ölçülmüştür. Emisyonlar, birim güç için ve birim saat başına kütlesel olarak hesaplanmış ve özgül emisyon olarak belirlenmiştir. Bulgular, D100 ve B100 yakıtları ile kıyaslanarak tartışılmıştır.

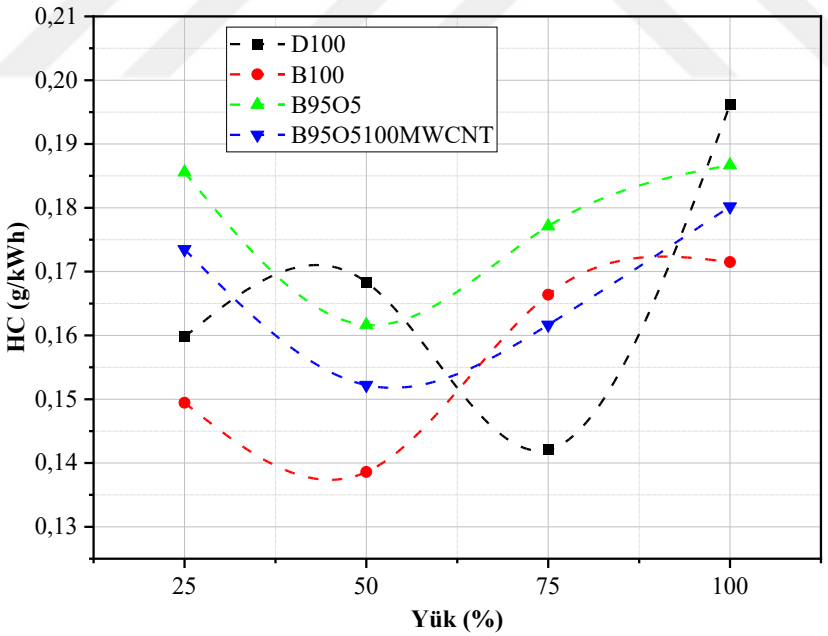
8.1.3.1. Özgül HC emisyonu

HC emisyonlarının oluşumuna neden olan faktör, yakıtın eksik yanması olgusudur. Motorun enjeksiyon stratejisi, yakıt/hava oranı, silindir duvar sıcaklığı, silindir içi boşlukların çokluğu, yakıtın fiziksel ve kimyasal özellikleri HC emisyonlarını etkileyen parametrelerdir (EdwinGeo ve ark., 2021; Sekar ve ark., 2020).

Şekil 8.13'te özgül HC emisyonlarının motor yüküne bağlı değişimleri verilmiştir. %50 yük değerleri haricinde, genel olarak yük yüzdesinin artışıyla, HC emisyonu yükselmiştir. Örnek olarak, B95O5'in %25, %50, %75 ve %100 yükteki HC değerleri sırasıyla 0,19, 0,16, 0,18 ve 0,19 g/kWh olarak ölçülmüştür. Yükün arttırılmasıyla silindir içerisine sevk edilen yakıt miktarı artar. Yüksek yükte, düşük yüklere kıyasla daha zengin bir karışım meydana gelmektedir. HC emisyonlarındaki bu artış, hava/yakıt oranının azalmasından kaynaklanmaktadır. Benzer bir eğilim El-Seesy ve ark. tarafından kaydedilmiştir (El-Seesy ve ark., 2020).

Maksimum HC emisyonu tam yük şartlarında yaklaşık 0,20 g/kWh ile D100'de meydana gelmiştir. En düşük HC ise %50 yük durumunda yaklaşık 0,138 g/kWh ile B100'de elde edilmiştir. D100 ile karşılaştırıldığında, HC emisyonlarındaki ortalama değişim; B100 için %6,07 azalırken, B95O5 için %6,7 ve B95O5100MWCNT için %0,18 artmıştır. B100'ün oksijen içeriğinin yüksek olması yakıtın oksidasyonuna katkı sağlamaktadır (Nutakki ve ark., 2022). Bunun sonucu olarak, HC emisyonlarında azalma gerçekleşmiştir. B100'ün yanma veriminin D100'den bir miktar fazla olması bu sonucu doğrulamaktadır. D100'de daha kararsız bir yanma oluşurken diğer yakıtlarda daha kararlı bir yanma olmuştur. D100 için HC emisyonundaki dengesizlikler ölçüm hatası sınırları içerisinde olduğundan dolayı göz ardı edilebilir. B95O5 ve MWCNT katkılı yakıtın B100'e göre HC emisyonlarındaki değişim sırasıyla %13,59 ve %6,64 artmıştır. B95O5'de bulunan n-oktanolün yüksek gizli buharlaşma ısısı, silindir içerisinde soğutma

etkisi yaratmaktadır. B95O5 yüksek oksijen içeriğinden dolayı fakir bir karışım oluşturmaktadır (Ashok ve ark., 2019). Ayrıca, n-oktanol yüksek viskoziteye ve daha uzun TG süresine sahiptir. Bu faktörler, yakıtın atomizasyon kalitesini kötüleştirdiği gibi buharlaşma kabiliyeti üzerinde de olumsuz etkiye neden olmaktadır (Manieniyan ve ark., 2021). Dolayısıyla, hava/yakıt karışımı kötüleşir. Bu etkiler, HC emisyonunu artıran temel nedenler arasındadır. MWCNT ilaveli yakıt karışımının HC emisyonunun B100'e göre arttığı ancak, B95O5'e kıyasla azaldığı görülmüştür. MWCNT'lerin yüksek yüzey alanı/hacim oranı, ısı transfer hızını arttırmaktadır. Termal iletkenlik özelliklerinin yüksek olması, yakıt damlacıklarında mikro patlama olgusuna neden olmaktadır. Mikro patlama ile ikincil atomizasyonun gerçekleşmesi, yakıtın daha küçük zerrelere ayrılmasına ve hava/yakıt karışımının iyileşmesine katkıda bulunur (Manieniyan ve ark., 2021; Mei ve ark., 2019). Bu süreç, yakıt oksidasyonunu arttırdığından, HC emisyonlarında azalmaya sebep olmaktadır. Ancak, MWCNT katkısının, n-oktanolun soğutma etkisini telafi edemediği ve bunun sonuç olarak da B100'e göre HC emisyonu artış yaşandığı kaydedilmiştir.



Şekil 8.13. Motor yüküne bağlı özgül HC emisyonu

8.1.3.2. Özgül NO emisyonu

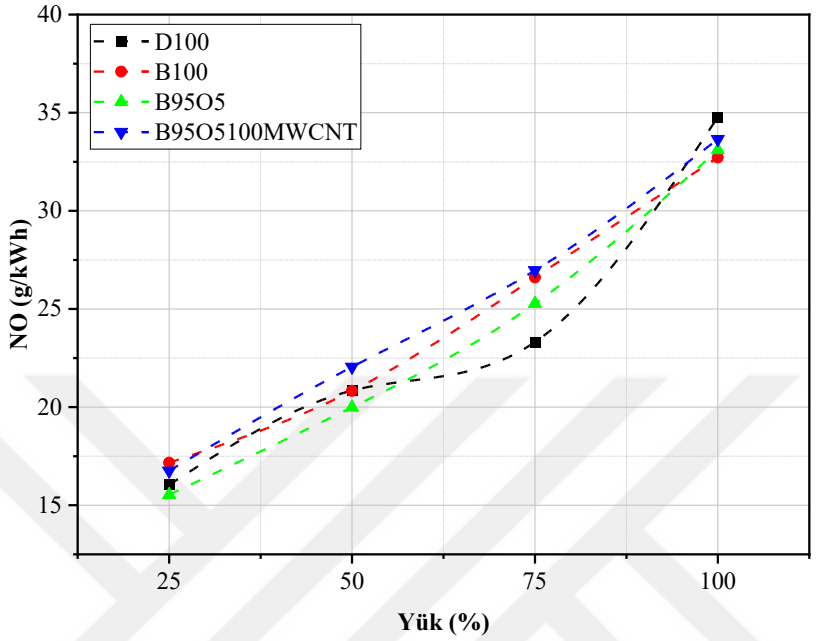
NO oluşumuna etki eden en önemli faktörler arasında, silindir içi sıcaklık, oksijen konsantrasyonu ve gazların silindir içerisinde kalma süreleri yer almaktadır (Ashok ve ark., 2019; El-Seesy ve ark., 2021a). NO emisyonları, büyük oranda yüksek sıcaklığın fonksiyonu olan Zeldovich mekanizması ile meydana gelmektedir (Cao ve ark., 2020).

Şekil 8.14'te özgül NO emisyonunun motor yüküne bağlı değişimi gösterilmiştir. Yük arttıkça NO emisyonlarında artış gerçekleşmiştir. Örneğin, B100'ün %25, %50, %75 ve tam yükteki NO değerleri sırasıyla 17,17, 20,83, 26,60 ve 32,71 g/kWh olarak ölçülmüştür. Motor yükü arttıkça silindir içerisine daha fazla yakıt sürülmektedir. Gerçekleşen yanma reaksiyonu sonucunda daha yüksek silindir içi sıcaklıkları meydana gelmektedir. Dolayısıyla, yüksek silindir içi sıcaklıkları, NO emisyonunun artışıyla sonuçlanmıştır. NO emisyonundaki bulgular literatür ile benzerlik göstermektedir (Ashok ve ark., 2019; Devarajan ve ark., 2019; El-Seesy ve ark., 2021b).

Maksimum NO emisyonu tam yükte D100 ile 34,77 g/kWh iken, minimum NO, %25 yükte, aynı yakıt ile yaklaşık olarak 15,53 g/kWh olarak ölçülmüştür. D100 ile kıyaslandığında, diğer test yakıtlarının ortalama özgül NO değişimi; B100 için %2,47 ve B95O5100MWCNT için %4,69 artarken B95O5 için 1,13 azalmıştır. D100'e göre tüm test yakıtlarının NO emisyonlarında artış gözlemlenmiştir. B95O5'in NO emisyonlarındaki değişim B100'e göre %3,51 azalırken, B95O5100MWCNT'nin NO emisyonu %2,16 artmıştır. n-Oktanolün yüksek gizli buharlaşma ısısının neden olduğu soğutma etkisi, düşük yüklerde B100'ün B95O5'ten daha yüksek NO üretmesine sebep olur (Ashok ve ark., 2019). Tam yükte, silindir içi sıcaklıklarının yüksek olmasına ilaveten, B95O5'in yüksek oksijen konsantrasyonu NO emisyonunun artışına neden olmaktadır (Prasad ve ark., 2020). Düşük yükte, silindir içerisinde daha az miktarda yakıtın yanması ve yüksek hava-yakıt oranın soğutma etkisi, silindir içi sıcaklıklarını azaltarak NO emisyonlarının azalmasına neden olmaktadır.

B95O5'e MWCNT ilavesiyle ortalama NO emisyonunda, diğer test yakıtlarına kıyasla daha fazla artış gözlemlenmiştir. B95O5'e MWCNT ilavesi, yakıtın reaktivitesinin artmasında önemli rol oynamaktadır. MWCNT'lerin yüksek yüzey alanı/hacim oranları, ısı iletim hızını arttırmaktadır. Bu durum, yakıtın ikincil atomizasyonuna ve hızlı buharlaşmasına katkıda bulunmaktadır. Her ne kadar EGS diğer yakıtlara göre düşük olsa

da, NO oluşumu, yanma süresi, yakıtların oksijen içeriğine ve silindir içi sıcaklığa bağlıdır. B95O5100MWCNT'deki bu artışın oksijen varlığı ile birlikte MWCNT'lerin katalitik etkileri sonucunda soğutma etkisini azaltmasından kaynaklandığı söylenebilir.



Şekil 8.14. Motor yüküne bağlı özgül NO emisyonlarının değişimi

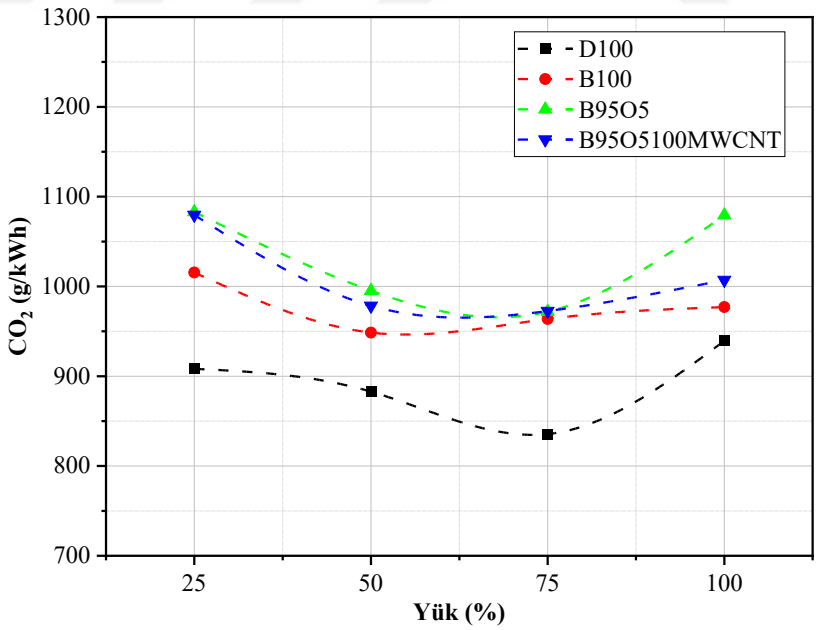
8.1.3.3. Özgül CO_2 emisyonu

İdeal bir tam yanma reaksiyonunda, ürünler arasında CO_2 ve H_2O bulunmaktadır. CO_2 emisyonundaki artış, yakıtın tam yanma şartlarına yaklaştığının göstergesidir. Dolayısıyla, yanma reaksiyonunda ürünler arasında CO_2 yüzdesinin fazla olması, yanmanın daha iyi olduğunun göstergesidir (Gumus ve ark., 2012; Shrivastava ve Verma, 2020).

Özgül CO_2 emisyonun motor yüküne bağlı değişimi Şekil 8.15'te verilmiştir. Dizel motorlarda yük arttıkça hava/yakıt oranı azalmaktadır. Yük arttıkça tüm yakıtların özgül CO_2 emisyonunda bir miktar azalma, tam yüke doğru yaklaştıkça artış meydana geldiği gözlemlenmiştir. Örneğin, B100'ün %25, %50, %75 ve %100 yük şartlarındaki CO_2 değerleri sırasıyla 1015,47, 948,48, 963,72 ve 977,1 g/kWh olarak ölçülmüştür. Yük arttıkça silindir içerisine daha fazla miktarda yakıt püskürtülmektedir. Burada yük, pedal açıklığını ifade etmektedir ve hacimsel olarak aynı miktarda yakıtın silindire gönderilmesi anlamına gelmektedir. Ayrıca, püskürtme zamanlaması ve basıncı,

belirlenmiş avans ve basınç haritalarına göre uygulanmaktadır. Özgül CO_2 emisyonundaki azalmanın, zengin karışım ve yüke bağlı programlanmış püskürtme stratejilerden kaynaklandığı düşünülmektedir.

Maksimum CO_2, tam yük şartlarında B95O5 ile 1082,83 g/kWh iken, en düşük %75 yükte D100 ile 835,57 g/kWh'dır. Test yakıtlarının ortalama CO_2 değeri D100'e kıyasla B100 için %9,51, B95O5 için %15,80 ve B95O5100MWCNT için yaklaşık %13,24 artmıştır. B100'ün CO_2 emisyonu D100'den daha yüksektir. CO_2'deki artışın nedeni, B100'ün oksijen içeriğinin daha fazla karbon atomuyla reaksiyona girmesinden kaynaklanmaktadır. Bu bulgular literatür ile uyum içerisindedir (Amid ve ark., 2020; Nanthagopal ve ark., 2018; Shrivastava ve Verma, 2020). B95O5 ve MWCNT ilaveli yakıtların B100'e göre CO_2 emisyonu sırasıyla %5,74 ve %3,4 oranında artmıştır. B95O5'in yanma veriminin yüksek olması, daha fazla karbonun oksijenle tepkimeye girmesi anlamına gelmektedir. Bu nedenle en yüksek CO_2, B95O5 ile meydana gelmiştir. MWCNT katkılı yakıtın, B95O5'e kıyasla CO_2 emisyonunda bir miktar azalma kaydedilmiştir. CO_2'deki bu azalmanın, yakıtta bulunan O_2'nin CO_2 yerine NO oluşumuna harcandığı düşünülmektedir.



Şekil 8.15. Motor yüküne bağlı özgül CO_2 emisyonunun değişimi

8.2. Bor Oksit Nanopartikül İlaveli Test Yakıtlarının Performans, Emisyon ve Yanma Karakteristikleri

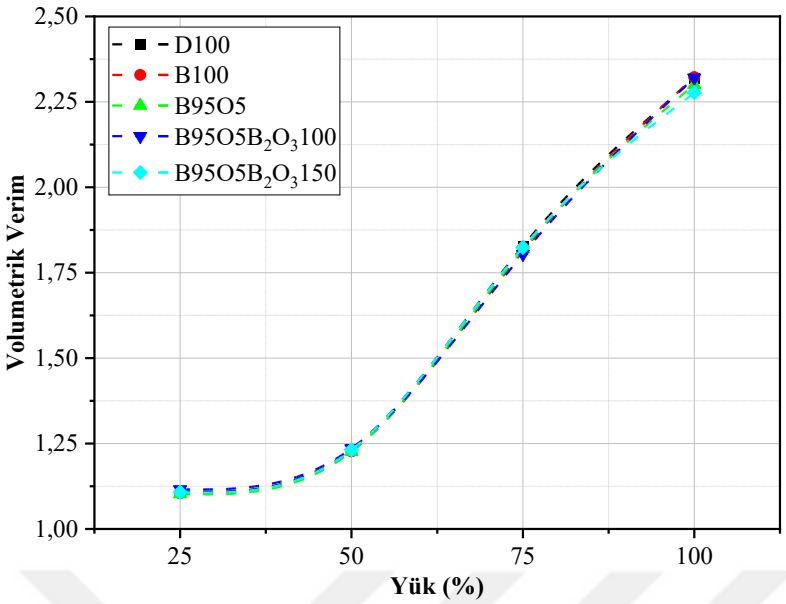
Bu bölümde, yakıt karışımına B_2O_3 nanopartikül ilavesinin motor performansına, yanma karakteristiklerine ve egzoz emisyonlarına olan etkileri grafiksel olarak verilmiştir. Bulgular, belirlenen yakıt özellikleri göz önünde bulundurularak literatür çalışmaları ile karşılaştırmalı incelenmiştir.

8.2.1. Motor performansı

Bu bölümde, B95O5 karışım yakıtına B_2O_3 nanopartikül katkısının kullanıldığı bir CRDI dizel motorun farklı motor yüklerinde fren motor gücü, FÖYT, FÖET, FTV, yanma verimi ve EGS gibi motor performans karakteristikleri karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Burada motor yükü, dizel motordaki yakıt kontrol kolunun (gaz pedalı) hareket yüzdesini ifade etmektedir. Örneğin, %25 pedal açıklığı, %25 motor yükü olarak ifade edilmiştir.

8.2.1.1. Volumetrik Verim

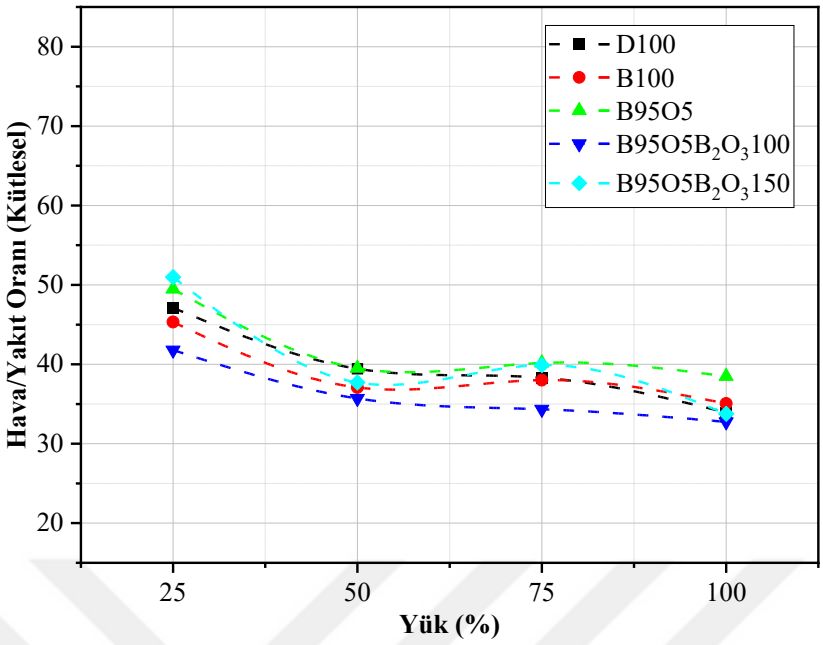
Şekil 8.16'da 1500d/d sabit motor hızında, motor yüküne bağlı volumetrik verimin değişimi gösterilmiştir. Tüm yük şartlarında test yakıtlarının volumetrik verimi 1'den yüksektir. Motor yükünün arttırılmasıyla, turboşarj daha fazla miktarda havayı emme manifolduna gönderir. Bu nedenle, yükün arttırılmasına bağlı olarak tüm test yakıtları için volumetrik verim artmıştır. Örneğin, B95O5$B_2O_3$100'nin %25, %50, %75 ve tam yükteki volumetrik verimi sırasıyla, 1,1, 1,2, 1,8 ve 2,3'tür. Emme manifoldunda bulunan hava sıcaklığı ve basıncı test yakıtlarındaki farklılığa bağlı olarak kısmi bir değişikliğe uğramaktadır. Örneğin, tam yük şartlarında D100, B100, B95O5, B95O5$B_2O_3$100 ve B95O5$B_2O_3$150'nin volumetrik verimleri sırasıyla, 2,32, 2,32, 2,30, 2,32 ve 2,27'dir. Bu nedenle, test yakıtlarının volumetrik verimleri birbirlerine yakındır.



Şekil 8.16. Motor yüküne bağlı volumetrik verimin değişimi

8.2.1.2. Hava-yakıt oranı

Şekil 8.17'de 1500 d/d'de motor yüküne bağlı hava/yakıt (H/Y) oranının değişimi gösterilmiştir. B95O5$B_2O_3$100'ün %25, %50, %75 ve %100 yükteki H/Y oranı sırasıyla 41,78, 35,7, 34,34 ve 32,76'dır. Yük arttıkça, turboşarj sistemi, emme manifolduna hava miktarda hava göndermektedir. Motorun ECU'su hava miktarına ve yük şartlarına bağlı olarak silindire daha fazla miktarda yakıt püskürtmektedir. Böylelikle silindir içerisinde daha zengin bir karışım oluşturulmaktadır. B95O5$B_2O_3$100'ün H/Y oranı D100'e göre yaklaşık olarak %8,9 azalırken B95O5$B_2O_3$150'nin H/Y oranı yaklaşık olarak %2,2 artmıştır. B95O5$B_2O_3$100'ün H/Y oranı B100 ile kıyaslandığında ortalamada yaklaşık %7 düşerken, B95O5$B_2O_3$150 ile yaklaşık olarak %4,4 artmıştır. Yakıtların, H/Y oranındaki artış, yakıt tüketim değerlerinin azalmasından kaynaklanırken, H/Y oranındaki azalma yakıt tüketim değerinin artmasından kaynaklanmaktadır.



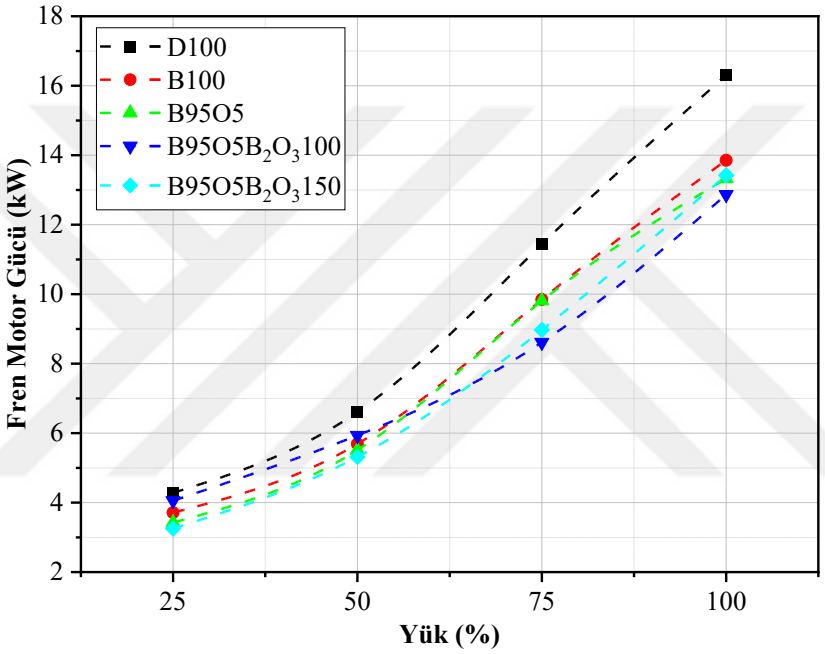
Şekil 8.17. Motor yüküne bağlı hava-yakıt oranının değişimi

8.2.1.3. Efektif motor gücü

Şekil 8.18'de sabit hızda efektif motor gücünün yüke bağlı değişimi gösterilmiştir. Yük artışı ile birlikte tüm yakıt çalışmalarında motor gücünün arttığı gözlemlenmiştir. Örneğin, B95O5$B_2O_3$100'ün %25, %50, %75 ve tam yükteki efektif motor gücü sırasıyla 4,06, 5,93, 9,97 ve 14 kW'tır. Yük değerinin arttırılması, silindir içerisine daha fazla yakıtın püskürtülmesini gerektirmektedir. Bunun sonucunda, tüm test yakıtları için motor gücü artmıştır. Ayrıca, test yakıtlarının farklı ısıl değerleri, aynı yük yüzdelerinde farklı motor güçlerinin oluşmasına neden olmuştur.

Tüm yük şartlarında, motor gücündeki maksimum değerler D100 ile elde edilmiştir. D100'e kıyasla, B95O5$B_2O_3$100 ve B95O5$B_2O_3$150 çalışmasında elde edilen motor gücü sırasıyla %12,08 ve %19,85 azalmıştır. Çalışmada tespit edilen maksimum güç, D100 ile tam yükte 16,3 kW iken, en düşük güç %25 yükte 3,25 kW ile B95O5$B_2O_3$150 çalışmasında belirlenmiştir. Aynı yük şartlarında D100, B95O5$B_2O_3$100 ve B95O5$B_2O_3$150 yakıtları, hacimsel olarak aynı miktarda silindir içerisine püskürtülmektedir. Burada, motor yükü pedal açıklığını ifade etmektedir. Fakat, motor gücündeki azalma, biyodizel ve n-oktanol karışımının ısıl değerinin D100'e kıyasla daha düşük olmasından kaynaklanmaktadır (Manigandan ve ark., 2020). B95O5$B_2O_3$100 ile

çalışmada ölçülen motor gücü B100'e kıyasla yaklaşık %2,59 artarken, B95O5$B_2O_3$150 ile çalışmada yaklaşık %6,5 azalmıştır. Yakıt karışımına 100 ppm doz nanopartikül ilavesi, hava-yakıt karışımının homojenliğini kolaylaştırarak, reaktivitesini arttırmakta ve bunun sonucunda yanma sürecini iyileştirmektedir (Berner ve ark., 2013; Saxena ve ark., 2017). Nanopartikül dozajının arttırılması, B_2O_3 partiküllerinin yakıt içerisindeki dispersiyonunu olumsuz yönde etkilediğinden motor gücünün düşmesine neden olmuştur. Homojen dağılım sergileyemeyen nanopartiküller yanma verimini azaltarak motor gücünün düşmesine neden olmaktadır.



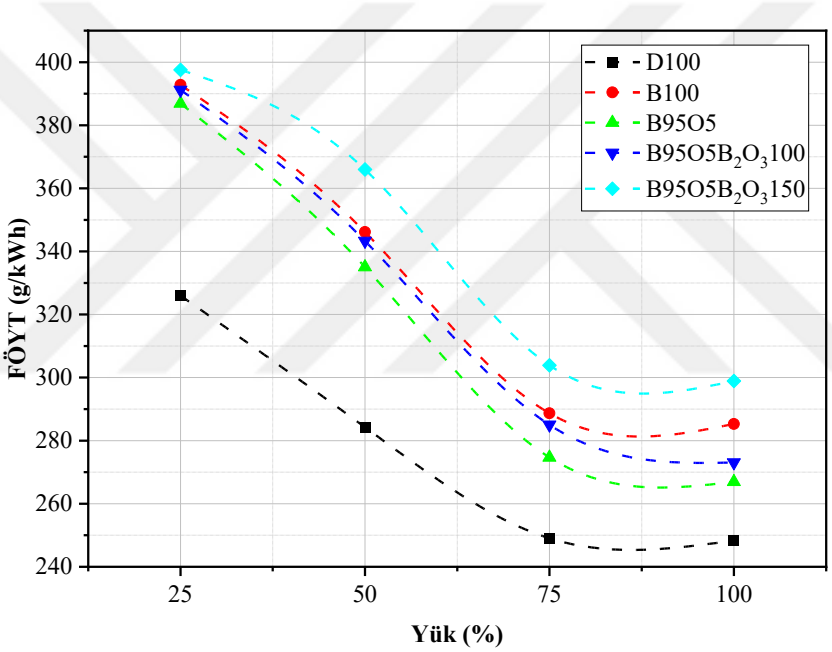
Şekil 8.18. Efektif motor gücünün yüke bağlı değişimi

8.2.1.4. Fren özgül yakıt tüketimi

Şekil 8.19'da FÖYT'nin sabit hızda yüke bağlı değişimi görülmektedir. Motor yükünün artışıyla tüm test yakıtlarında FÖYT değerlerinin azaldığı tespit edilmiştir. Örneğin, B95O5$B_2O_3$100'ün %25, %50, %75 ve tam yükteki FÖYT değerleri sırasıyla 391,19 g/kWh, 343,30 g/kWh, 285,02 g/kWh ve 273,06 g/kWh'tır. Bunun nedeni, yüksek motor yüklerinde silindir içi sıcaklıklarının artmasıyla daha verimli yanma reaksiyonlarının gelişmesidir (Saxena ve ark., 2017).

Test yakıtları arasında en düşük FÖYT, 248,37 g/kWh ile D100 ile sağlanmıştır. En yüksek FÖYT ise 298,93 g/kWh ile B95O5$B_2O_3$150'e aittir. Nanopartikül katkılı test

yakıtlarının FÖYT değerleri D100 ile kıyaslandığında, B95O5$B_2O_3$100'de %16,69, B95O5$B_2O_3$150'de %23,36 artmıştır. B95O5$B_2O_3$100 ile çalışmada ölçülen FÖYT B100'e kıyasla yaklaşık %1,55 azalırken, B95O5$B_2O_3$150 ile çalışmada yaklaşık %4,07 artmıştır. B95O5$B_2O_3$100, B100'e göre daha düşük FÖYT sergilerken, B95O5'e göre bir miktar artış göstermiştir. Çakmak (2021) çalışmasında, B20 içerisine farklı dozajlarda B_2O_3 nanopartikül ilave etmiştir. B_2O_3 dozajının arttırılması, yakıtın ısıl değerini ve viskozitesini arttırdığını bildirmiştir (Çakmak, 2021). Artan viskozite, yakıtın atomizasyon sürecini doğrudan etkilemektedir. Yeterince küçük zerrelere ayrılamayan yakıt daha yavaş buharlaşmaktadır. Nanopartikül dozunun artışı ile artan ısıl değer, efektif motor gücünü arttırsa da, viskozitedeki artış FÖYT'nin artışına neden olmuştur.

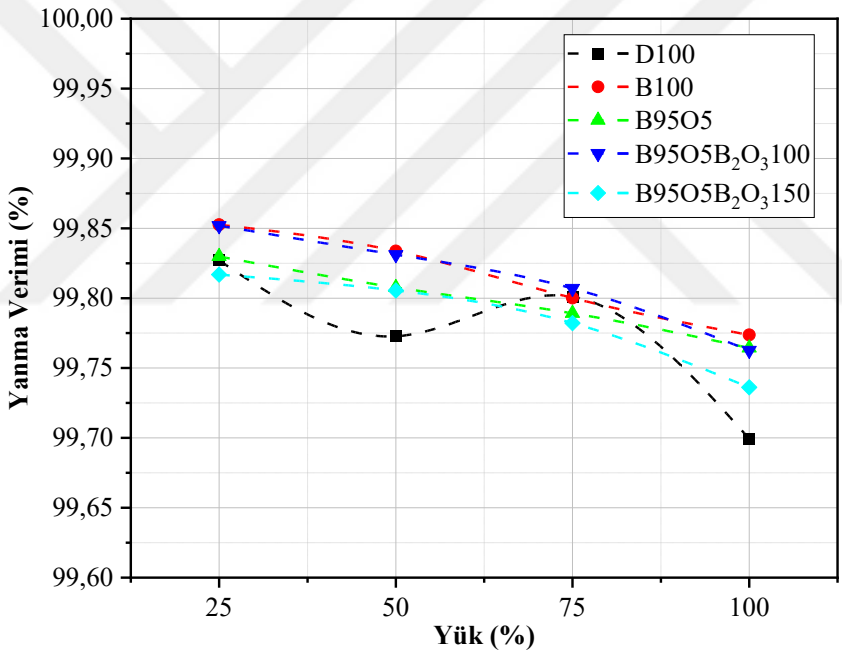


Şekil 8.19. Fren özgül yakıt tüketiminin yüke bağlı değişimi

8.2.1.5. Yanma verimi

Şekil 8.20'de sabit hızda motor yüküne bağlı olarak yanma veriminin değişimi gösterilmiştir. Yük miktarı arttıkça, tüm test yakıtlarının yanma verimlerinde azalma gözlemlenmiştir. Motor yükünün artışı ile birlikte, silindir içerisine püskürtülen yakıt miktarı da arttırılmaktadır. Oluşan zengin karışımın sonucunda, yakıtın bir kısmı tam yanma reaksiyonuna dahil olmamaktadır. Bu nedenle, yanma veriminde azalma eğilimi belirlenmiştir.

B95O5$B_2O_3$100 ve B95O5$B_2O_3$150 yakıtlarının yanma verimi D100'e göre sırasıyla %0,038 ve %0,005 daha yüksektir. Maksimum yanma verimi, %25 yükte B100 ile %99,85 iken en düşük yanma verimi tam yükte D100 ile 99,69 olarak hesaplanmıştır. B95O5$B_2O_3$100 ile çalışmada hesaplanan yanma verimi B100'e çok yakın bir değerde iken, B95O5$B_2O_3$150 ile çalışmada yaklaşık %0,03 azalmıştır. B100'e n-oktanol ilavesi yanma verimini düşürmektedir. Bu azalmanın muhtemel nedeni, n-oktanolun yüksek gizli buharlaşma ısısının bir sonucu olarak artan HC emisyonlarıdır. Karışım yakıta 100 ppm nanopartikül ilavesi, yakıtın ısı iletim miktarını arttırmakta, yakıtın reaktivitesini hızlandırmakta ve buharlaşma yeteneğini iyileştirmektedir. Diğer taraftan, nanopartikül dozunun arttırılması, egzoz emisyonlarını da arttırdığından dolayı yanma veriminde azalma kaydedilmiştir.

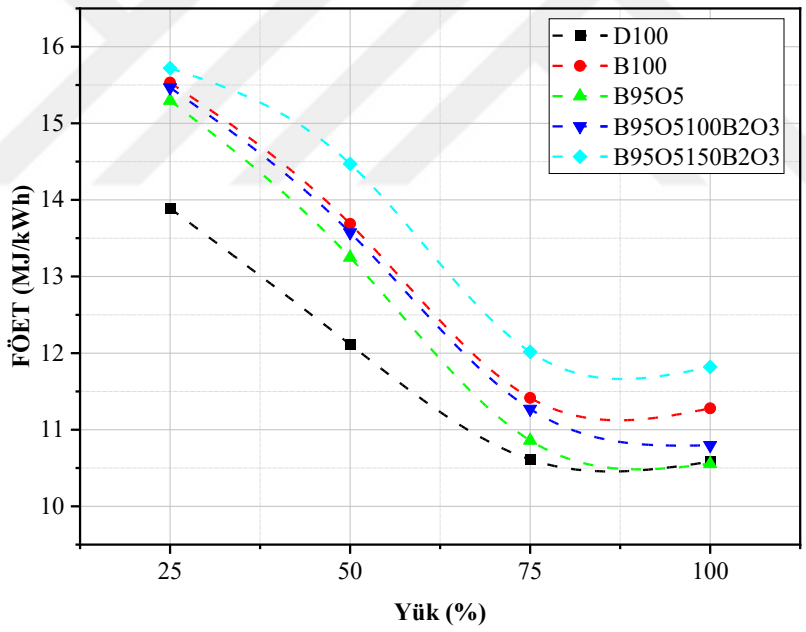


Şekil 8.20. Motor yüküne bağlı yanma verimi

8.2.1.6. Fren özgül enerji tüketimi

Şekil 8.21'de sabit motor hızında FÖET'nin motor yüküne bağlı değişimi gösterilmiştir. Yük arttıkça tüm test yakıtlarının FÖET değerlerinde azalma kaydedilmiştir. B95O5$B_2O_3$150 için %25, %50, %75 ve tam yük şartlarındaki FÖET değerleri sırasıyla 15,72 MJ/kWh, 14,47 MJ/kWh, 12,02 MJ/kWh ve 11,82 MJ/kWh'tır. Bunun nedeni, yüksek yük koşullarında silindir içi sıcaklıklarının artmasıdır (Tomar ve Kumar, 2020).

FÖET'de en düşük değer D100 çalışmasında tespit edilmiştir. Bunun temel nedeni, D100'ün ısıl değerinin diğer test yakıtlarından yüksek olmasıdır. Aynı zamanda, FÖET'nin yakıtın viskozitesine bağlı olduğu yapılan çalışmalarla belirtilmiştir (Tomar ve Kumar, 2020). FÖET'deki ortalama yüzde değişimler D100 ile karşılaştırıldığında B95O5$B_2O_3$100 ve B95O5$B_2O_3$150 için sırasıyla, %8,29 ve %14,47 artmıştır. B95O5$B_2O_3$100 ile çalışmada ölçülen FÖET B100'e kıyasla yaklaşık %1,55 azalırken, B95O5$B_2O_3$150 ile çalışmada yaklaşık %4,07 artmıştır. Maksimum FÖET %25 yük şartlarında B95O5$B_2O_3$150 ile 15,72 MJ/kWh iken, en düşük FÖET tam yükte B95O5 ile 10,55 MJ/kWh'dır. Bölüm 8.2.1.5'te belirtildiği gibi yanma verimindeki azalmaya bağlı olarak FÖET artış göstermiştir. Bir diğer neden ise, motor gücünün bir miktar azalmasıdır. Nanopartikül dozajının arttırılmasıyla yakıtın viskozitesinin arttığı, yapılan çalışmalarla bildirilmiştir (Çakmak ve Özcan, 2022). Bu nedenle, artan viskozite B95O5$B_2O_3$150 çalışmasında FÖET'de artışa neden olmuştur.



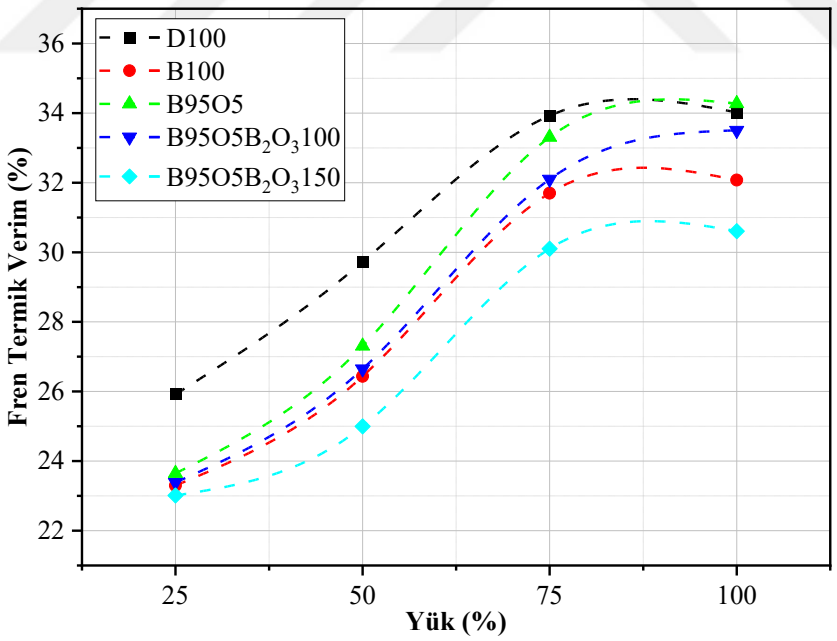
Şekil 8.21. Motor yüküne bağlı fren özgül enerji tüketimi

8.2.1.7. Fren termik verim

Şekil 8.22'de sabit devirde motor yüküne bağlı FTV eğrileri gösterilmiştir. Motor yükünün artışı ile tüm test yakıtlarının FTV değeri artmıştır. Örneğin, B95O5$B_2O_3$100'ün %25, %50, %75 ve %100 yükteki FTV değerleri sırasıyla %23,39, %26,65, %32,10 ve

%33,50'dir. Motor yükünün artışına bağlı olarak FÖYT'nin azalması sonucu FTV artış göstermiştir. Bunu yanı sıra, silindir içerisine daha fazla yakıtın püskürtülmesiyle enerji salınımın artması da FTV'nin artışına katkı sağlamaktadır (Alptekin, 2013; Tomar ve Kumar, 2020).

Maksimum FTV, B95O5 ile tam yükte %34,3 iken, minimum FTV B95O5$B_2O_3$150 ile %25 yükte %23,01 olarak hesaplanmıştır. Test motorunun püskürtme zamanlaması ve basıncı, D100 yakıt özelliklerine göre ECU tarafından optimize edildiği için, D100'ün FTV'si daha yüksektir. Test yakıtları ile elde edilen ortalama FTV değerleri D100 ile karşılaştırıldığında, B95O5$B_2O_3$100'de %6,43, B95O5$B_2O_3$150'de ise %12,03 azalmıştır. B95O5$B_2O_3$100 ile çalışmada hesaplanan FTV B100'e kıyasla yaklaşık %1,88 artarken, B95O5$B_2O_3$150 ile çalışmada yaklaşık %4,22 azalmıştır. B95O5 ile çalışmada B100, B95O5$B_2O_3$100 ve B95O5$B_2O_3$150'ye kıyasla daha yüksek FTV meydana gelmiştir. Nanopartikül ilaveli yakıtlara ait FÖYT'nin B95O5'e göre yüksek olması, FTV'nin azalmasına yol açmıştır. 150 ppm doz nanopartikül ilavesi, FÖYT'yi daha fazla arttırdığından dolayı FTV'de belirgin bir azalmaya neden olmuştur.

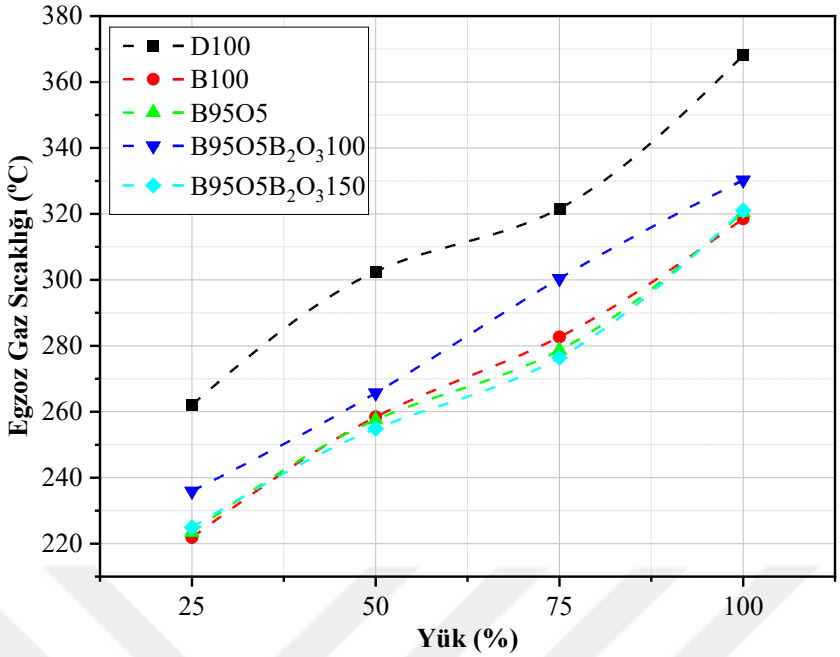


Şekil 8.22. FTV'nin yüke bağlı değişimi

8.2.1.8. Egzoz gaz sıcaklığı

EGS'nin sabit hızda motor yüküne bağlı değişimi Şekil 8.23'te verilmiştir. Yük arttıkça EGS yükselmektedir. Örnek olarak, B95O5'in %25, %50, %75 ve %100 yükteki EGS değerleri sırasıyla 223,45 ^{o}C, 257,55 ^{o}C, 278,67 ^{o}C ve 320,47 ^{o}C olarak ölçülmüştür. Yüke bağlı olarak EGS'deki bu artışının temel sebebi, silindir içerisine daha fazla miktarda yakıtın sevk edilerek yakılmasıdır. EGS'deki bu artışın bir başka sebebi ise, yakıt/hava oranındaki yükselmeyle, havanın soğutma etkisinin azalmasından kaynaklanmaktadır (Gad ve ark., 2020; Özsezen, 2007). EGS, yanma sonu sıcaklıklarının bir göstergesi olduğundan yanma sıcaklığındaki artış, EGS'yi arttırmaktadır.

Maksimum EGS, D100 ile tam yükte 368,16 ^{o}C iken, minimum EGS, B95O5$B_2O_3$150 ile %25 yükte 211,69 ^{o}C olarak ölçülmüştür. D100'ün ısıl değeri, diğer test yakıtların ısıl değerinden yüksek olması, EGS'nin daha yüksek seyretmesine neden olmaktadır. Test yakıtları ile oluşan ortalama EGS değerleri D100 ile kıyaslandığında, B95O5$B_2O_3$100 çalışmasında %9,73, B95O5$B_2O_3$150 çalışmasında %14,12 daha düşüktür. B95O5$B_2O_3$100 ile çalışmada ölçülen EGS B100'e kıyasla yaklaşık %4,7 artarken, B95O5$B_2O_3$150 ile çalışmada yaklaşık %0,4 azalmıştır.D100'den sonra maksimum EGS B95O5$B_2O_3$100 çalışmasına aittir. B_2O_3 nanopartikül katkısının yüksek yüzey alanı/ hacim oranı, yakıtın daha hızlı buharlaşmasını ve homojen karışım oluşumunu desteklemektedir. Aynı zamanda, viskozite, ısıl değer ve yoğunluk gibi yakıt özelliklerini değiştirmektedir. Nanopartikül dozunun arttırılması ile oluşan EGS B100'e kıyasla azalmıştır. Nanopartikül miktarının artışı, yakıtın viskozitesini arttırdığından dolayı atomizasyon kalitesini olumsuz yönde etkileyebilmektedir. Bu durumun, EGS'nin azalmasıyla sonuçlanmıştır.



Şekil 8.23. Egzoz gaz sıcaklığının motor yüküne bağlı değişimi

8.2.2. Yanma karakteristikleri

Yanma karakteristikleri, yakıtın yanma sürecinde krank mili açısına bağlı olarak silindir içi basıncında meydana gelen değişiklikleri, yanmanın aşamaları ve ısı dağılımı ile ilgili bilgiler sağlamaktadır. Karışım yakıta B_2O_3 nanopartikül katkısının D100, B100, B95O5 ve B95O5100MWCNT yakıtlarının krank açısına bağlı silindir gaz basıncı ve ısı dağılımı karşılaştırmalı olarak tartışılmıştır.

8.2.2.1. Silindir içi gaz basıncı

Şekil 8.24, 8.25, 8.26 ve 8.27'de sırasıyla %25, %50, %75 ve %100 yük şartlarındaki test yakıtlarının sabit hızda KMA'ya bağlı silindir gaz basıncının değişimi gösterilmiştir. Yük arttıkça tüm test yakıtlarının silindir gaz basınçlarında artış tespit edilmiştir. Örneğin, $B95O5B_2O_3100$'ün %25, %50, %75 ve tam yük şartlarındaki maksimum silindir içi gaz basıncı sırsıyla 91,30 bar, 108,60 bar, 156,02 bar ve 220,28 bar olarak ölçülmüştür. Bunun nedeni, yük arttıkça silindir içerisine daha fazla yakıtın alınmasıdır (Sayın ve ark., 2012).

Şekil 8.24'te tüm test yakıtlarının %25 yükte, sabit hızda, KMA'ya bağlı silindir içi gaz basıncının değişimi görülmektedir. Test yakıtları arasında maksimum tepe silindir gaz basıncı $B95O5B_2O_3100$ ile elde edilmiştir. Ardından, D100 maksimum silindir gaz

basıncı sergilemiştir. CRDI motorun püskürtme stratejisi ve püskürtme avansının, D100 için önceden belirlenmiş olması, en uygun çalışma şartlarını sağlamıştır. Ayrıca, D100'ün ısıl değerinin diğer test yakıtlarından yüksek olması, silindir basıncının artışında rol oynamaktadır (Prasad ve ark., 2020). D100'ün maksimum silindir gaz basıncı, 88,08 bar, B100'ün 87,09 bar, B95O5'in 86,61 bar, B95O5$B_2O_3$100'ün 91,30 bar ve B95O5$B_2O_3$150'nin 86,93 bar olarak ölçülmüştür. Tüm yakıtlar için maksimum basınç ÜÖN'dan sonra gerçekleşmiştir. D100 için 8 KMA, B100, B95O5 B95O5$B_2O_3$100 ve B95O5$B_2O_3$150 için ise 7 KMA olarak tespit edilmiştir. Bölüm 8.1.2.1'de ifade edildiği gibi nano yakıtların yüksek termal iletkenliğe sahip olması B95O5$B_2O_3$100 yakıtının maksimum silindir gaz basıncı üretmesine sebep olmuştur. Nanopartiküller yüksek yüzey alanı/hacim oranına sahiptir. Ayrıca, termal iletkenlikleri yüksektir ve radyasyon yoluyla alev cephesinden yayılan ısı enerjisini absorbe etme yetenekleri yüksektir (Çakmak, 2021; Gan ve ark., 2012). Silindir içerisine püskürtülen yakıt damlacığının içerisinde bulunan nanopartüküller, yakıt damlacığının ısı iletimini arttırmaktadırlar. Silindir içerisindeki sıcak gazlardan yakıt damlacığına olan ısı transferi sonucunda, mikro patlamalar meydana gelerek ikincil bir atomizasyon meydana gelmektedir. Böylece, yakıt damlacıkları parçalara ayrılarak çok sayıda ve daha küçük boyutlu hale gelirler. İlk damlacıklar ile kıyaslandığında, yeni oluşan damlacıkların toplam yüzey alanları daha fazladır. Yüzey alanındaki bu artış, yakıt damlacıklarının hızlı bir şekilde buharlaşmasını sağlamaktadır. Nanopartiküllerin bu etkileri, yakıtın kimyasal reaktivitesini arttırmaktadır.

Şekil 8.25'te tüm test yakıtlarının %50 yükte ve sabit hızda, KMA'ya bağlı olarak silindir içi gaz basıncının değişimi gösterilmiştir. Yükün arttırılması ile D100'ün silindir gaz basıncı diğer test yakıtlarına göre daha fazla artış sağlamıştır. D100'ün maksimum silindir gaz basıncı 110,31 bar iken, B100'ün 105,83 bar, B95O5'in 106,22 bar, B95O5$B_2O_3$100'ün 108,60 bar ve B95O5$B_2O_3$150'nin 105,79 bar olarak ölçülmüştür. Maksimum silindir gaz basıncının konumu incelendiğinde, D100, B100, B95O5$B_2O_3$100 ve B95O5$B_2O_3$150 için 7 KMA iken, B95O5 için 6 KMA'dır. Maksimum silindir gaz basınçlarının oluştuğu KMA'da önemli bir değişiklik olmamıştır. D100'den sonra maksimum basınç B95O5$B_2O_3$100 ile meydana gelmiştir. 100 ppm dozda nanopartikül ilavesi, yakıtın yanma özelliklerini iyileştirmesi sebebiyle diğer karışım yakıtlara göre en yüksek silindir gaz basıncını oluşturmuştur. Ancak, 150 ppm dozda eklenen B_2O_3, yakıtın

viskozitesini arttırması nedeniyle atomizasyon kalitesini kötüleştirmiştir (Çakmak ve Özcan, 2022).

Şekil 8.26'da tüm test yakıtlarının %75 yükte ve sabit hızda, KMA'ya bağlı olarak silindir içi gaz basıncının değişimi gösterilmiştir. Bu yük şartlarında D100, en yüksek maksimum silindir gaz basıncı sergilemiştir. Grafikte, D100 ile diğer test yakıtları arasındaki maksimum basınç farkının arttığı görülmektedir. D100'ün maksimum silindir gaz basıncı 168,60 bar iken, B100'ün 156,44 bar, B95O5'in 159,36 bar, B95O5$B_2O_3$100'ün 156,02 bar ve B95O5$B_2O_3$150'nin 158,48 bar olarak ölçülmüştür. D100, B95O5, B95O5$B_2O_3$100 ve B95O5$B_2O_3$150 yakıtlarının maksimum silindir gaz basınçlarının konumu ÜÖN'den sonra 7 KMA iken, B100'ün ise 8 KMA'dır. Maksimum silindir gaz basıncı D100 ile elde edilmiştir. En düşük maksimum silindir gaz basıncı B95O5$B_2O_3$100 ile elde edilmiştir. Artan silindir içi sıcaklıklarının, B95O5$B_2O_3$100'ün TG süresini, diğer yakıtlara göre daha fazla kısaltması, ön karışımlı yanma safhasında daha az yakıtın yanmaya dahil olmasıyla açıklanabilir (Sayın ve ark., 2012). B95O5$B_2O_3$150 ile çalışmada, B100 ve B95O5'e göre önemli bir değişim tespit edilmemiştir.

Şekil 8.27'de tüm test yakıtlarının tam yükte ve sabit hızda, KMA'ya bağlı olarak silindir içi gaz basıncının değişimi gösterilmiştir. En yüksek maksimum silindir gaz basıncı B95O5$B_2O_3$100 ile elde edilmiştir. Test yakıtlarının maksimum silindir gaz basınçları D100, B100, B95O5, B95O5$B_2O_3$100 ve B95O5$B_2O_3$150 için sırasıyla 220,04 bar, 212,35 bar, 215,39 bar, 220,28 bar ve 211,23 bar ölçülmüştür. Maksimum silindir gaz basınçlarının konumlarına bakıldığında, D100, B100 ve B95O5 için 8 KMA iken, B95O5$B_2O_3$100 ve B95O5$B_2O_3$150 nano yakıtlarında 7 KMA'dır. Tam yük şartlarında meydana gelen yüksek silindir içi sıcaklıkların etkisiyle ve nanopartiküllerin termal iletkenliği sayesinde yakıt damlacığına olan ısı transferi artmaktadır. Sıcaklığı artan yakıt damlacıkları daha küçük boyutlu yakıt damlacıklarına parçalanmaktadır. Damlacık sayısının artışı, toplam yüzey alanlarını arttırdığından, yakıtın buharlaşma kabiliyetini arttırarak hava ile daha homojen bir karışım oluşturmaktadır. Ayrıca, yakıtın kimyasal reaktivitesi de artmaktadır. Bu etkiler, B95O5$B_2O_3$100'ün yanma hızı üzerinde baskın bir role sahip olduğundan dolayı silindir gaz basıncında artışa neden olduğu yorumlanmıştır.

8.2.2.2. Isı dağılımı

Dizel motorda TG süresi yakıtın püskürtülmesi ile yanmanın başladığı zaman aralığını kapsamaktadır. TG, fiziksel ve kimyasal gecikme sürelerinin toplamına eşittir. Kimyasal gecikme süresinin, TG üzerinde önemli bir role sahip olduğu bildirilmiştir (Çanakcı, 2007). Yakıtların setan sayısı TG süresini etkileyen önemli bir faktördür. Ancak, yakıtların setan sayıları birbirlerine yakın bir değerdedir. Bu yüzden, yakıtların viskozite ve yoğunluk gibi fiziksel özellikleri ile yakıt katkı maddelerinin yakıt reaktivitesi üzerinde oluşturduğu etkiler, TG üzerinde setan sayısından daha baskın bir role sahip olabilmektedir.

Şekil 8.24'te %25 yükte ve sabit hızda KMA'ya bağlı olarak ısı dağılımı gösterilmiştir. Test yakıtları arasında D100, daha erken krank açılarında ısı dağılımı göstermiştir. 100 ppm konsantrasyondaki B_2O_3'ün yüksek yüzey alanı/hacim oranı, nano yakıtın termal iletkenliği arttırdığından, atomizasyon ve buharlaşma kabiliyetini arttırarak TG'yi kısaltmaktadır. B95O5$B_2O_3$150'in viskozitesiyle birlikte, yoğunluğunun D100'e kıyasla yüksek ve uçuculuğunun düşük olması, yakıt atomizasyonu üzerinde olumsuz etkiye sahiptir. Bu durum, daha büyük damlacık boyutlarında kalmalarına sebep olmaktadır. Bu yüzden, yakıtın buharlaşma kabiliyeti azalmaktadır. Bu sonuç, yakıtın fiziksel özelliklerinin, kimyasal özelliklerinden daha baskın olmasına ve TG'nin D100'den daha yüksek olmasıyla sonuçlanmıştır.

Maksimum ısı dağılımı D100 için 57,41 J/^{o}, B100 için 64,69 J/^{o}, B95O5 için 66,01 J/^{o}, B95O5$B_2O_3$100 için 67,65 J/^{o} ve B95O5$B_2O_3$150 için 69,39 J/^{o} olarak hesaplanmıştır. Maksimum ısı dağılımının meydana geldiği krank açısı D100 için -5 KMA iken, B100, B95O5, B95O5$B_2O_3$100 ve B95O5$B_2O_3$150 için -4 KMA ölçülmüştür. Maksimum ısı dağılımı B95O5$B_2O_3$150 ile elde edilirken, minimum ısı dağılımı D100 ile elde edilmiştir. Nano yakıtların düşük yük şartlarında maksimum ısı dağılımı sergiledikleri belirlenmiştir. Bunun nedeni, nano yakıtın, biyodizelden kaynaklı oksijen içeriği ve nanopartikülün termal etkileri sayesinde yanma hızını arttırmasından kaynaklanmaktadır.

Şekil 8.25'te %50 yükte ve sabit hızda KMA'ya bağlı olarak ısı dağılımı gösterilmiştir. Bu yük şartlarında artan silindir içi sıcaklıkları, yakıtların buharlaşma hızlarını etkilediğinden TG süresini bir miktar azaltmaktadır. Nanopartiküllerin termal etkileri

nedeniyle, yakıtın buharlaşma hızı arttığından, B95O5$B_2O_3$100'ün TG süresi, D100'e daha yakındır.

Maksimum ısı dağılımı D100 için 78,80 J/^{o}, B100 için 75,93 J/^{o}, B95O5 için 88,65 J/^{o}, B95O5$B_2O_3$100 için 86,51 J/^{o} ve B95O5$B_2O_3$150 için 85,62 J/^{o} olarak hesaplanmıştır. Maksimum ısı dağılımının konumları ise D100, B100, B95O5$B_2O_3$100 ve B95O5$B_2O_3$150 yakıtlarında -5 KMA ölçülürken, B95O5 ise -4 KMA'da ölçülmüştür. Nano yakıtların %50 yük şartlarında, D100 ve B100'den daha yüksek ısı dağılımı sergiledikleri anlaşılmaktadır. Nanopartiküllerin yüksek yüzey alanı/hacim oranı, silindir içi gazlarından yakıt damlacıklarına olan ısı transferini arttırmaktadır. Termal etkinin neden olduğu ısı iletimi sayesinde, yakıt damlacıkları mikro patlama ile daha küçük boyutlu yakıt damlacıkları haline gelmektedir (Lv ve ark., 2022). Meydana gelen küçük boyutlu yakıt damlacıklarının buharlaşmaları kolaylaşmakta ve yanma hızı artmaktadır. Bu olgunun, maksimum ısı dağılımını yükselttiği söylenebilir.

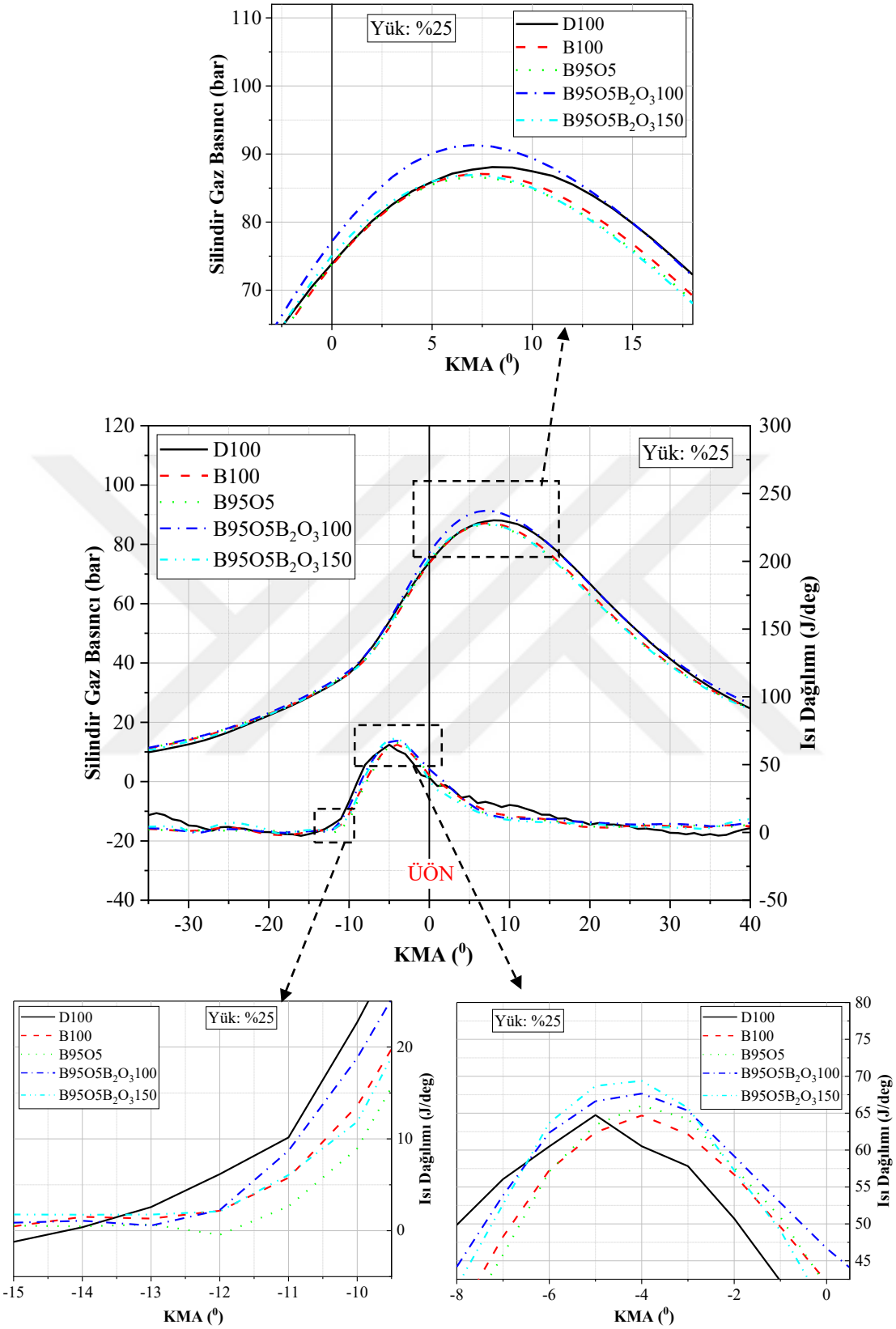
Şekil 8.26'da %75 yükte ve sabit hızda KMA'ya bağlı olarak ısı dağılımı gösterilmiştir. %75 yükte silindir içi sıcaklıklarının artışı, nano yakıtların TG süresini B100'e kıyasla daha da azalttığı belirlenmiştir. Muhtemelen, nanoparçacıkların termal etkilerinin, yakıtın buharlaşma özelliklerini geliştirmesinden kaynaklanmaktadır.

Isı dağılımının maksimum değeri, D100 ile elde edilirken, en düşük B100'de gözlemlenmiştir. Maksimum ısı dağılımı D100, B100, B95O5, B95O5$B_2O_3$100 ve B95O5$B_2O_3$150 yakıtları için sırasıyla 98,78 J/^{o}, 88,98 J/^{o}, 92,38 J/^{o}, 95,7 J/^{o} ve 95,95 J/^{o} olarak hesaplanmıştır. Maksimum ısı dağılımının konumları D100, B100 ve B95O5 için -2 KMA iken, B95O5$B_2O_3$100 ve B95O5$B_2O_3$150 için -3 KMA olarak ölçülmüştür. Isı dağılımı konumlarının ÜÖN'ye yaklaştığı belirlenmiştir. Muhtemelen, test motorunun önceden belirlenmiş enjeksiyon stratejileri ve püskürtme zamanlamasından kaynaklanmaktadır. D100'den sonra en yüksek ısı dağılımı sırasıyla B95O5$B_2O_3$100 ve B95O5$B_2O_3$150 ile elde edilmiştir. Nanopartiküllerin yüksek termal iletkenlikleri sayesinde, yakıt-hava karışımı iyileşmekte ve yakıtın kimyasal reaktivitesi artmaktadır. Böylece, nano yakıtların maksimum ısı dağılımlarında, B100 ve B95O5'e göre daha yüksek değerler elde edilmiştir.

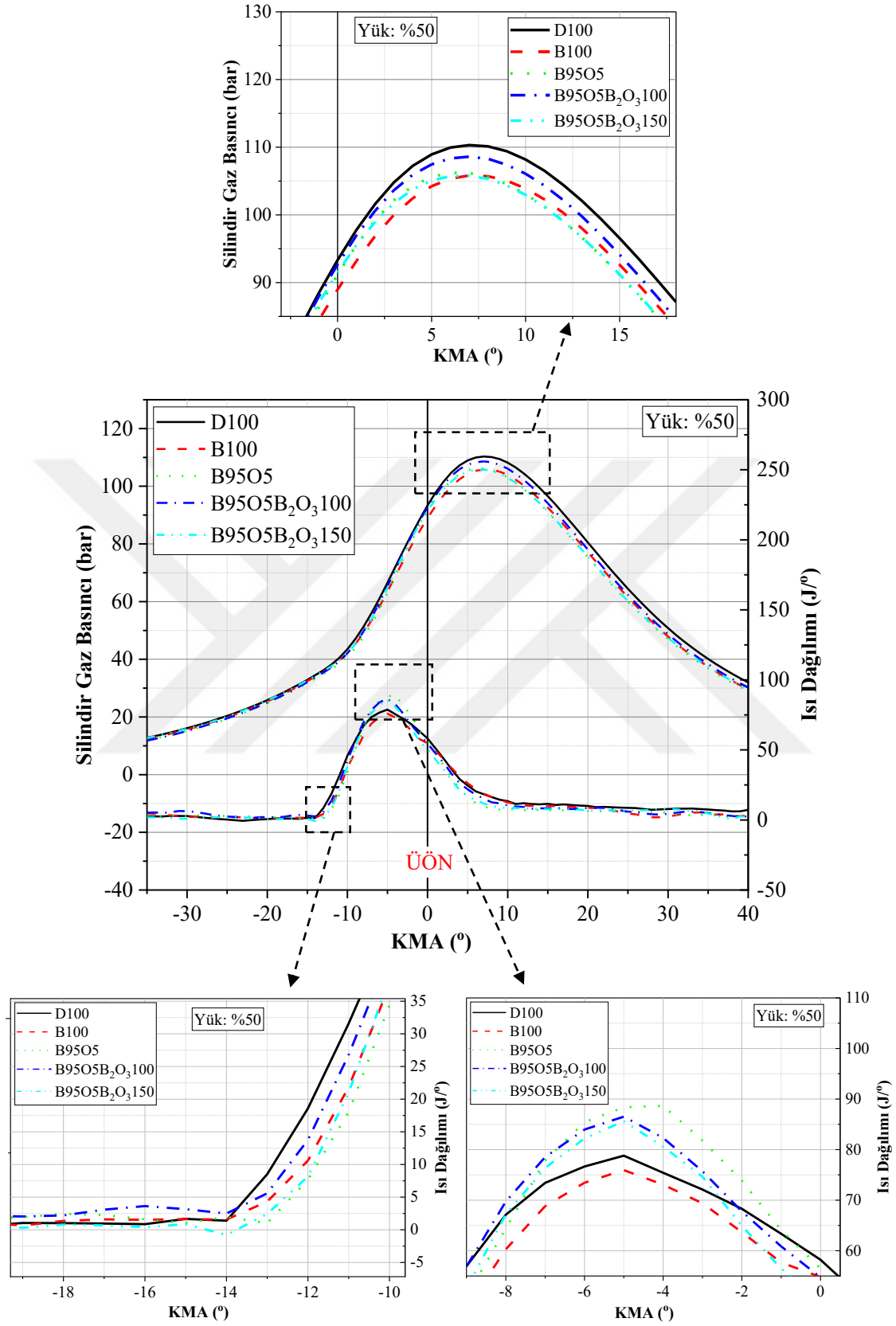
Şekil 8.27'de tam yükte ve sabit hızda KMA'ya bağlı olarak ısı dağılımı gösterilmiştir. D100 ile diğer test yakıtları arasındaki ısı çıkış hızının başlangıçları arasındaki fark

artmıştır. D100 çalışmasında daha erken bir KMA'da ısı çıkışı yaşanırken, diğer test yakıtları ile daha geç bir KMA'da ısı çıkışı gözlemlenmiştir. Bunun nedenlerinden biri, CRDI motorun enjeksiyon stratejilerinin D100'e göre planlanmış olmasıdır. Diğer bir neden ise B100 ve karışım yakıtların yüksek viskoziteleri, yüksek yoğunlukları ve düşük uçuculuklarının buharlaşma kabiliyetini kötüleştirmesidir. Bu nedenle, B100 ve karışım yakıtların TG süresi D100'e göre daha uzundur.

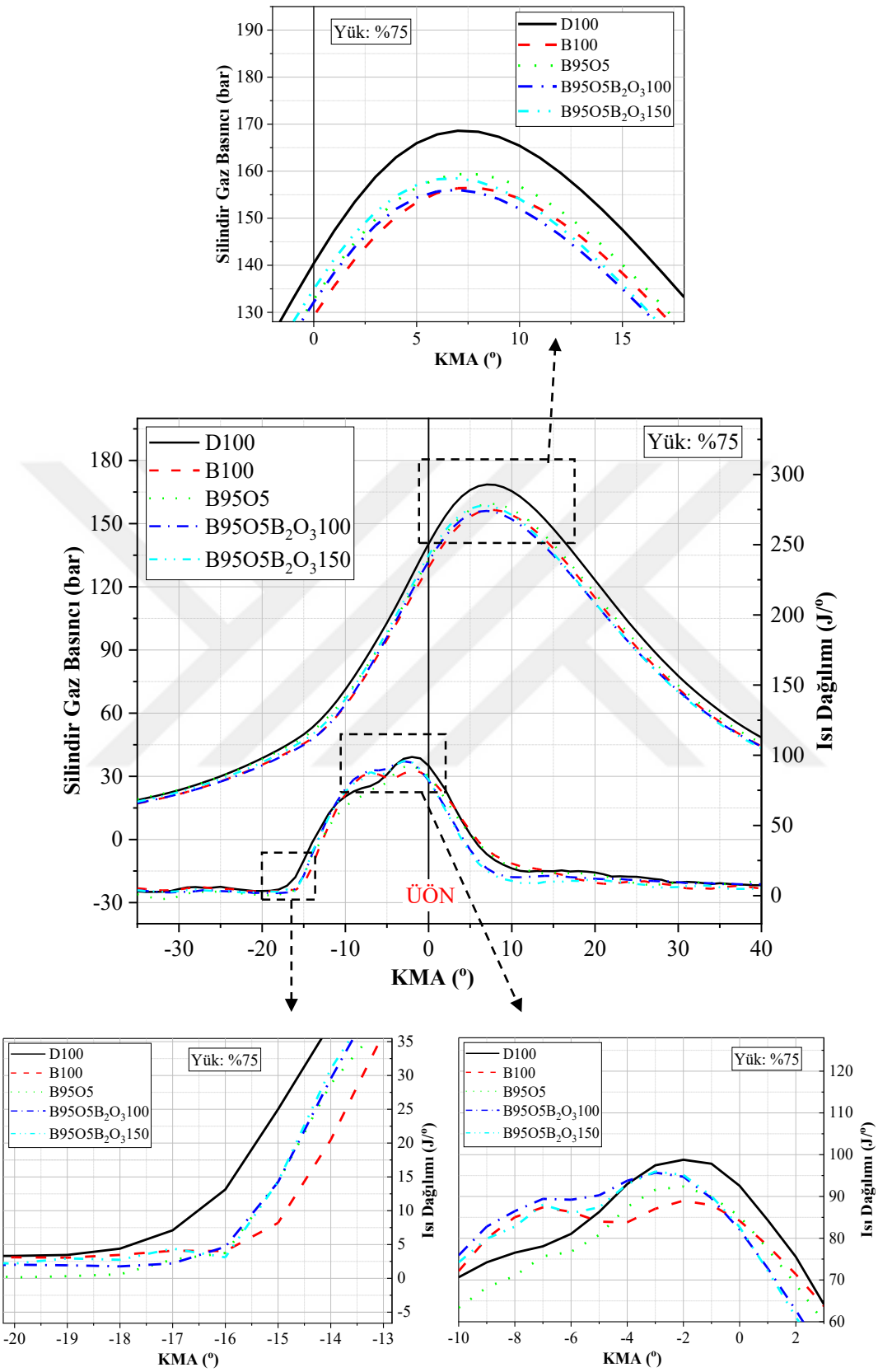
Maksimum ısı dağılımı D100 ile elde edilirken, en düşük B95O5$B_2O_3$100 ile elde edilmiştir. Maksimum ısı dağılımı D100 için 127,54 J/^{o}, B100 için 120,19 J/^{o}, B95O5 için 119,82 J/^{o}, B95O5$B_2O_3$100 için 119,24 J/^{o} ve B95O5$B_2O_3$150 için 123,62 J/^{o} olarak hesaplanmıştır. Maksimum ısı dağılımının konumları incelendiğinde; D100 için -5 KMA, B100, B95O5 ve B95O5$B_2O_3$150 için -4 KMA iken, B95O5$B_2O_3$100 için -3 KMA'dır. B100, B95O5 ve B95O5$B_2O_3$100 için maksimum ısı çıkışlarının benzerlik gösterdiği tespit edilmiştir. B95O5$B_2O_3$150 ise D100'e daha yakın ısı çıkışı sergilemiştir. Muhtemelen, 150 ppm dozajda eklenen B_2O_3 nanopartikülünün tam yük şartlarındaki yüksek silindir içi sıcaklıklarının bir sonucu olarak yakıtın yanma hızında, 100 ppm doz B_2O_3'den daha etkili olmasından kaynaklanmaktadır. Ayrıca, B95O5$B_2O_3$150'nin FÖYT değerinin yüksek olması da ısı çıkışının yüksek olmasına neden olmuştur (Erdoğan, 2019). B95O5$B_2O_3$150'nin B95O5$B_2O_3$100'den daha erken ısı dağılımı sergilemesi, yanma hızının daha yüksek olduğu gerçeğini desteklemektedir.



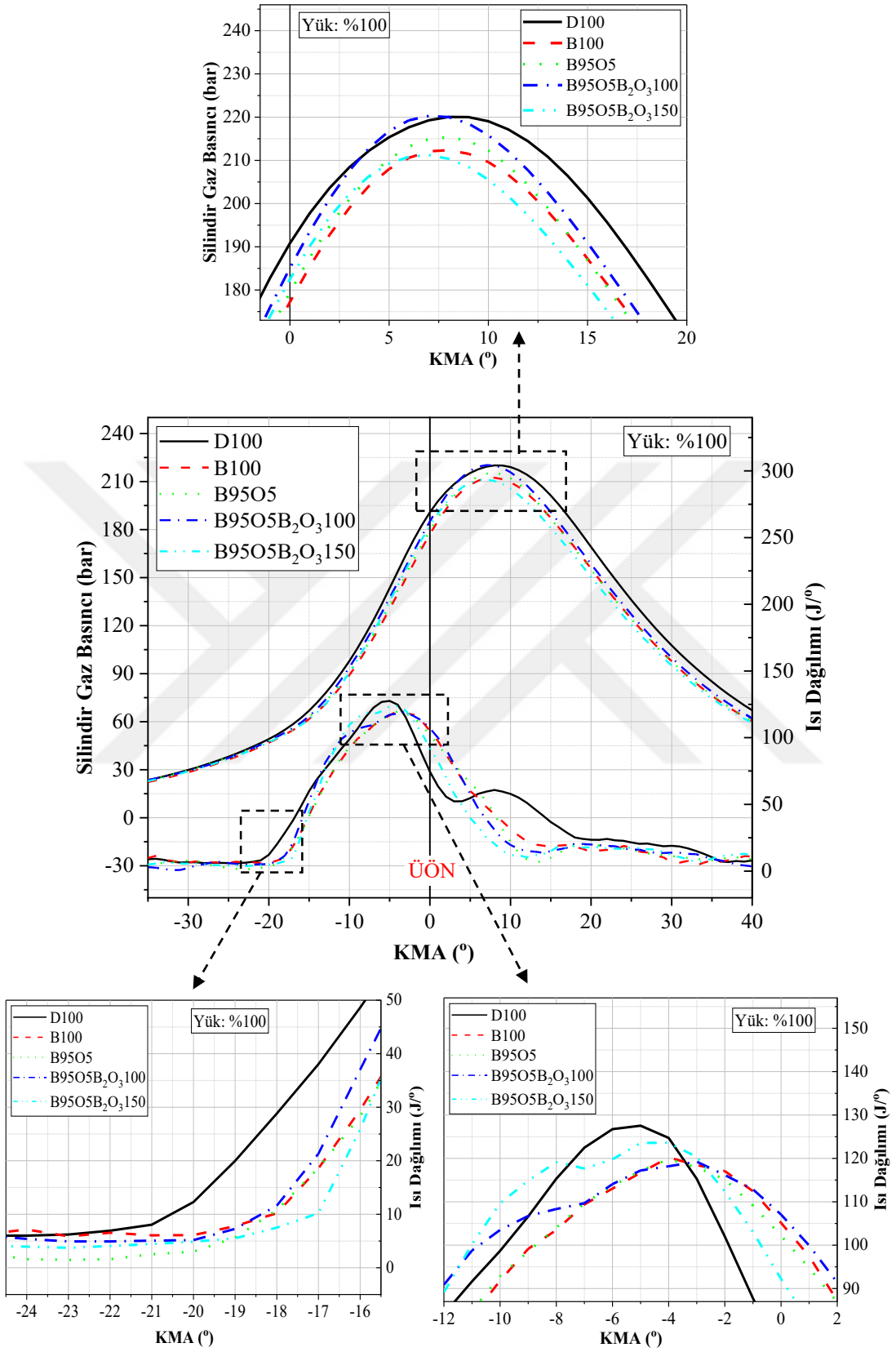
Şekil 8.24. %25 yükte silindir gaz basıncı ve ısı dağılımı



Şekil 8.25. %50 yükte silindir gaz basıncı ve ısı dağılımı



Şekil 8.26. %75 yükte silindir gaz basıncı ve ısı dağılımı



Şekil 8.27. Tam yükte silindir gaz basıncı ve ısı dağılımı

8.2.3. Egzoz emisyonları

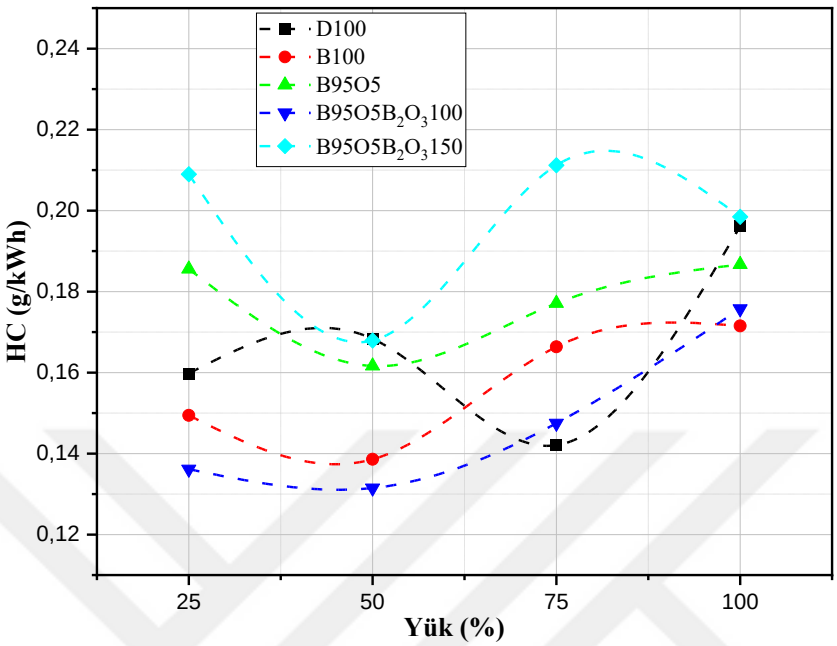
HC ve NO emisyonlarının ppm olarak, CO_2 emisyonunun ise % olarak ölçüldüğü bu çalışmada nanopartikül katkısı olarak B_2O_3 kullanılmıştır. Ölçülen egzoz emisyonları, birim güç için ve birim saat başına kütlesel olarak hesaplanmış ve özgül emisyon olarak belirlenmiştir. Bulgular, D100 ve B100 yakıtları ile kıyaslanarak tartışılmıştır.

8.2.3.1. Özgül HC emisyonu

Şekil 8.28'de, özgül HC emisyonlarının sabit hızda yüke bağlı değişimleri gösterilmiştir. HC emisyonu yük artışına bağlı olarak genellikle yükselmiştir. Örneğin, B95O5$B_2O_3$100 yakıtının %25, %50, %75 ve tam yükteki HC değerleri sırasıyla 0,14 g/kWh, 0,13 g/kWh, 0,15 g/kWh, ve 0,18 g/kWh olarak ölçülmüştür. Yük arttırıldıkça silindirlere daha fazla yakıt püskürtülmesi karışımın zenginleşmesine neden olmaktadır. Bu nedenle, hava/yakıt oranı düşer ve HC emisyonu artar. Bu sonuç, literatürle benzerlik göstermektedir (Nutakki ve ark., 2022; Prasad ve ark., 2020).

Maksimum HC emisyonunu, %75 yükte B95O5$B_2O_3$150 yakıtı ile 0,21g/kWh olarak hesaplanırken, en düşük HC emisyonu ise %50 yükte B95O5$B_2O_3$100 yakıtı ile 0,13 g/kWh olarak elde edilmiştir. B95O5$B_2O_3$100'ün HC emisyonu değişimi, D100'e kıyasla ortalama %11,33 azalmıştır. B95O5$B_2O_3$150 ile çalışmada D100'e kıyasla HC emisyonu %18,03 artmıştır. B95O5$B_2O_3$100 ile çalışmada ölçülen HC emisyonu B100'e kıyasla yaklaşık %5,6 azalırken, B95O5$B_2O_3$150 ile çalışmada yaklaşık %25,6 artmıştır. D100 ve B95O5$B_2O_3$150 ile çalışmalarda kararsız bir yanma oluşurken, diğer yakıtlarda daha kararlı bir yanma sağlanmıştır. Bu değişken durum ölçüm hatası sınırları içerisindedir. B95O5$B_2O_3$100 ile HC emisyonlarında önemli bir azalma sağlanmıştır. Nanopartiküllerin termal iletkenliği ve mikro patlama olgusu sayesinde yakıt-hava karışımını desteklediği için yakıtın kimyasal reaktivitesini arttırmaktadır. Bu durum, yakıtın oksidasyonunu arttırır ve HC emisyonlarında azaltıcı rol oynar. Nanopartikül dozajının 150 ppm'e yükseltilmesi, yakıttaki B_2O_3 homojenliğini azaltmakta, yakıtın TG süresini uzatmaktadır. Ayrıca, B_2O_3'ün oransal olarak arttırılması, karışım yakıtın viskozitesini arttırmakta ve yakıtın buharlaşma kabiliyeti olumsuz yönde etkilenmektedir (Çakmak ve Özcan, 2022). Bu nedenle, yakıtın buharlaşma kabiliyetini azaltmaktadır. Bu etkilerin sonucunda, tam yanma için gerekli süre sağlanamadığından HC emisyonu artmaktadır Bu sonuçlar,

yapılan çalışmalarla uyum içerisindedir (Kumar ve ark., 2020; Manieniyan ve ark., 2021; Sithard ve Kumar, 2020).



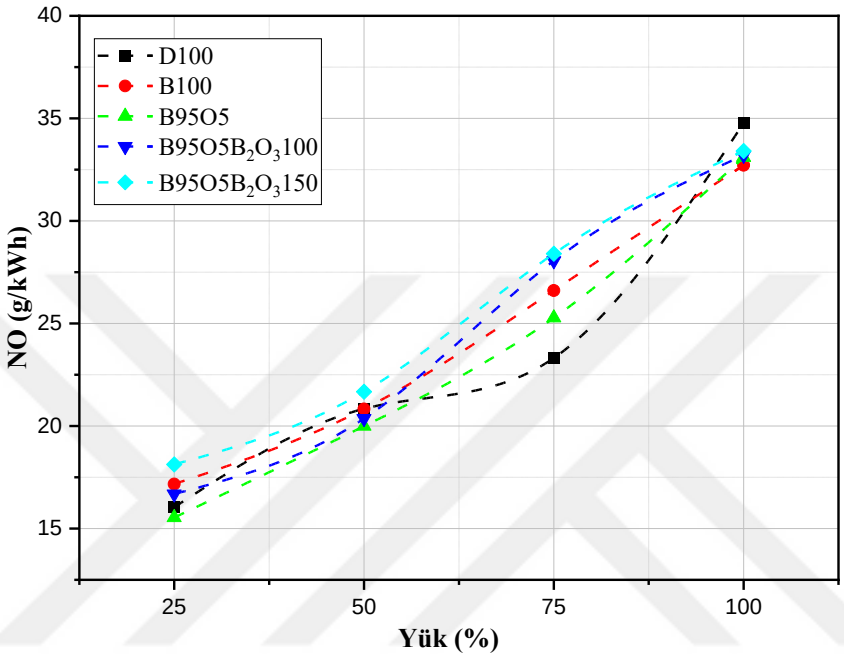
Şekil 8.28. HC emisyonunun yüke bağlı değişimi

8.2.3.2. Özgül NO emisyonu

Şekil 8.29'da sabit hızda motor yüküne bağlı NO değişimi gösterilmiştir. Yük arttıkça NO emisyonları artış göstermiştir. Örnek olarak, B95O5$B_2O_3$150'nin %25, %50, %75 ve %100 yükteki NO emisyonu sırasıyla 18,712 g/kWh, 22,66 g/kWh, 28,39 g/kWh ve 33,41 g/kWh olarak ölçülmüştür. Motor yükü arttıkça, silindire daha fazla yakıt sürülür. Yanma reaksiyonu sonucunda daha yüksek silindir içi sıcaklığı elde edildiğinden NO emisyonları artış gösterir (Cao ve ark., 2020). Yükün artmasıyla birlikte EGS'nin artması NO oluşumunu destekler. Elde edilen bulgular yapılan çalışmalarla benzerlik göstermektedir (Banapurmath ve ark., 2014b; Kishore ve Gugulothu, 2022).

Maksimum özgül NO, tam yük koşullarında D100 ile 34,73 g/kWh olarak ölçülmüştür. Minimum NO ise, %25 yükte B95O5 ile 15,53 g/kWh'dir. B95O5$B_2O_3$100'ün NO emisyonu değişimi, D100'e kıyasla ortalama %3,51 artmıştır. B95O5$B_2O_3$150 ile çalışmada D100'e kıyasla NO emisyonu %6,98 artmıştır. B95O5$B_2O_3$100 ve B95O5$B_2O_3$150'nin NO emisyonları B100 ile karşılaştırıldığında ise sırasıyla, %1,01 ve %4.41 artmıştır. Nanopartiküllerin termal etkileri yakıtın yanma hızını arttırır. Yanma

reaksiyonunun erken sona ermesi, yanma süresinin kısalmasıyla sonuçlanır. Ayrıca, EGS, D100 hariç diğer test yakıtlarından daha yüksektir. Buna ilaveten, yakıtta bulunan oksijenin de etkisiyle spesifik NO emisyonu artmıştır (Devarajan ve ark., 2019). Yanma hızının artışı, yanma süresinin kısalmasına ve bunun sonucu olarak da NO emisyonlarının artışına yol açmaktadır.

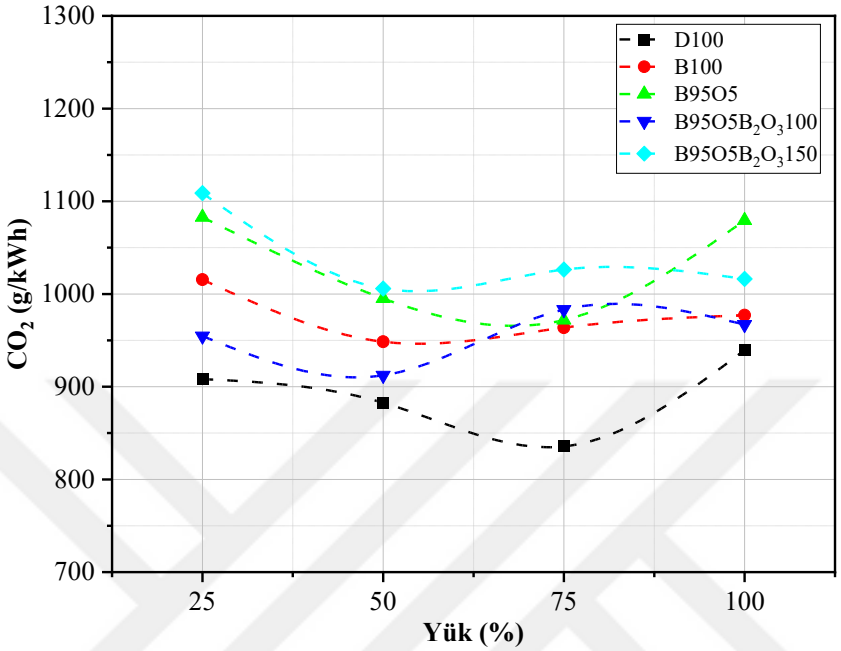


Şekil 8.29. NO emisyonunun yüke bağlı değişimi

8.2.3.3.Özgül CO_2 emisyonu

Şekil 8.30'da sabit hızda motor yüküne bağlı CO_2 emisyonunun değişimi gösterilmiştir. Yük arttıkça özgül CO_2 emisyonlarında kompleks bir eğilim tespit edilmiştir. Örneğin, B95O5$B_2O_3$100'ün %25, %50, %75 ve %100 yükteki özgül CO_2 emisyonu sırasıyla 954,63 g/kWh, 912,28 g/kWh, 983,24 g/kWh ve 967,1 g/kWh olarak ölçülmüştür. Tam yük koşullarında B95O5$B_2O_3$150 ile en yüksek CO_2 1108,9 g/kWh iken, %75 yük koşullarında D100 ile en düşük CO_2 835,57 g/kWh ölçülmüştür. B95O5$B_2O_3$100 ve B95O5$B_2O_3$150'nin CO_2 emisyonları, D100'e göre sırasıyla yaklaşık olarak %7,05 ve %16,59 artmıştır. Aynı yakıtlar B100 ile kıyaslandığında ise, 100 ppm nanopartikül ilavesiyle %2,24 azalırken, 150 ppm nanopartikül ilavesiyle %6,47 atmıştır. Nanopartikül ilavesinin 100 ppm olması durumunda yakıtların özgül CO_2 emisyonlarının B100'e göre azaldığı gözlemlenmiştir. 100 ppm doz nanopatikülün FÖYT değerlerinin B100'e göre

daha düşük olması CO_2 emisyonlarında azalmaya neden olmuştur. Nanopartikül dozajının 150 ppm'e yükseltilmesiyle FÖYT değerleri artmakta ve daha fazla yakıt tüketiminden dolayı CO_2 artmaktadır.



Şekil 8.30. CO_2 emisyonunun yüke bağlı değişimi

9. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında tek silindirli, 1,12 litre hacimli, CRDI enjeksiyon sistemli bir dizel motor kullanılmıştır. Deney yakıtları olarak, D100, B100, B95O5, B95O5100MWCNT, B95O5$B_2O_3$100 ve B95O5$B_2O_3$150 kullanılmıştır. Deneyler, 1500 d/d sabit motor hızında ve dört farklı motor yükünde (%25, %50, %75 ve %100) gerçekleştirilmiştir. Deney sonucunda motor performansı, egzoz emisyonları ve yanma analizi ile ilgili bulgular tartışılmış ve aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

Motor performansı ile ilgili başlıca sonuçlar aşağıda verilmiştir:

- Tüm test yakıtlarının volumetrik verimi yük arttıkça artmıştır. Deney yakıtları arasındaki volumetrik verimde belirgin bir farklılık görülmemiştir.

- Hava-yakıt oranı tüm deney yakıtları için yük arttıkça azalmıştır. B95O5'in H/Y oranı artarken nanopartikül ilavesiyle H/Y oranı genellikle azalmıştır.

- MWCNT ile çalışmada, tüm yük koşullarında en yüksek fren motor gücü değerleri D100 ile elde edilmiştir. B100 ve B95O5 yakıtlarının ısıl değerlerinin düşük olması nedeniyle daha düşük fren motor gücü değerleri sergilemiştir. MWCNT katkılı karışım yakıtın fren motor gücü değerleri B100'e göre azalmıştır. B95O5$B_2O_3$100'ün termofiziksel özellikleri, fren motor gücünü arttırdığı ancak, nanoparçacık dozajının 150 ppm'e yükseltilmesiyle azaldığı belirlenmiştir.

- En düşük FÖYT değerleri D100 yakıtında ölçülürken, en yüksek FÖYT değerleri B95O5$B_2O_3$150 ile çalışmada elde ölçülmüştür.B100'e n-oktanol eklenmesiyle FÖYT, nispeten azalmıştır. MWCNT ilavesi ile FÖYT azalırken, 100 ve 150 ppm B_2O_3 nanopartikül ilavesi FÖYT'yi arttırmıştır. Ancak, B95O5$B_2O_3$100 ile çalışmada FÖYT B100'e göre azalmıştır.

- Genel olarak D100 ile elde edilen FTV, diğer test yakıtlarından daha yüksektir. Maksimum FTV B95O5100MWCNT ile oluşurken, minimum FTV B95O5$B_2O_3$150 ile gözlemlenmiştir. Yakıt karışımına MWCNT ve 100 ppm B_2O_3 nanopartikül ilavesi FTV'yi yükseltmiştir.

- Yanma veriminde en yüksek değerler B100 ile elde edilirken, en düşük yanma verimi D100 ile elde edilmiştir. B100'e en yakın yanma verimi B95O5$B_2O_3$100'e aittir. Nanopartikül katkılı yakıtların yanma verimleri B100'e göre düşük iken, D100'e göre daha yüksektir.

- FÖYT'de olduğu gibi FÖET'de en düşük değer tam yükte B95O5100MWCNT ile meydana gelmiştir. Maksimum FÖET B100 ile ölçülmüştür. Karışım yakıta 100 ppm MWCNT ve 100 ppm B_2O_3 nanoparçacıkların eklenmesi B100'e göre FÖET'yi azaltmıştır. Karışım yakıta 150 ppm B_2O_3 nanoparçacıkların eklenmesiyle FÖET en yüksek değere ulaşmıştır.

- En yüksek EGS değerleri tüm yük şartlarında D100 ile ölçülmüştür. 100 ppm MWCNT ilavesi ile B100'e göre EGS'de önemli artış yaşanmazken, 100 ppm B_2O_3 ilavesiyle artmıştır. n-Oktanol ve 150 ppm B_2O_3 ilavesinin B100'e göre EGS'leri azalmıştır.

Yanma karakteristikleri ile ilgili başlıca sonuçlar aşağıda verilmiştir:

- MWCNT ile çalışmada tüm yük koşullarında maksimum silindir içi gaz basıncı D100 ile elde edilmiştir. MWCNT katkılı yakıtın %25 ve %50 yük şartlarında maksimum silindir gaz basıncı B100'göre daha düşüktür. Ancak, MWCNT ilaveli yakıtın %75 ve tam yükteki maksimum silindir gaz basıncı B100'e göre nispeten artmıştır. B_2O_3 katkılı yakıtın %25 ve tam yük şartlarında maksimum silindir gaz basıncına ulaştığı gözlemlenmiştir. Ancak, %50 ve %75 yükte D100 maksimum silindir gaz basıncına ulaşmıştır. Genel olarak, B95O5, B100'den daha yüksek maksimum silindir gaz basıncına sahiptir. 100 ppm B_2O_3 katkılı yakıt %75 yük haricinde diğer yük şartlarında B100'den daha yüksek maksimum silindir içi gaz basıncına sahiptir. 150 ppm nanopartikül katkılı yakıtın maksimum silidir gaz basıncı, B100'e göre önemli bir yükselme sağlamamıştır.

- MWCNT ile çalışmada ve %25 yük şartlarında en yüksek ısı dağılımı B95O5100MWCNT ile sağlanmıştır. En düşük ısı dağılımı ise aynı yük şartlarında D100 ile oluşmuştur. En yüksek ısı dağılımı %50 yük şartlarında B95O5 ile sağlanırken, en düşük ısı dağılımı B100 ve B95O5100MWCNT ile meydana gelmiştir. D100 ile çalışmada %75 ve tam yükte maksimum ısı dağılımı meydana gelmiştir. B_2O_3 nanopartikül ilaveli yakıt çalışmasında %25 ve %50 yük şartlarında D100 ve B100'den daha yüksek ısı dağılımı sergilenirken, %75 ve tam yükte D100 maksimum ısı dağılımı sergilemiştir. Tam yük haricinde B_2O_3 ilaveli yakıtlar ve B95O5, B100'den daha yüksek maksimum ısı dağılımına sahiptir.

Egzoz emisyonları ile ilgili başlıca sonuçlar aşağıda verilmiştir:

- Test yakıtlarından ortalama en yüksek özgül HC emisyonu, B95O5$B_2O_3$150 kullanımıyla kaydedilirken, en düşük HC emisyonu B95O5$B_2O_3$100 ile belirlenmiştir. B100 ile kıyaslandığında, MWCNT ilaveli yakıt karışımının HC emisyonlarında bir miktar artış olmasına rağmen, B95O5' e göre azalma sağlanmıştır.

- Genel olarak en yüksek NO değerleri B95O5$B_2O_3$150 ile belirlenmiştir. MWCNT katkılı yakıt çalışmasında da B95O5$B_2O_3$100'e benzer NO emisyonları tespit edilmiştir. Nanopartikül katkılı yakıtların NO emisyonları B100'e göre daha yüksek ölçülmüştür. Ancak, B95O5, B100'e göre daha düşük NO üretmiştir.

- CO_2 emisyonlarında en yüksek değerler B95O5 karışım yakıtında tespit edilirken, en düşük CO_2 emisyonu D100'de tespit edilmiştir. B95O5'e nanopartikül ilavesi ile CO_2 emisyonu azalmıştır. Ancak, MWCNT ve 150 ppm B_2O_3 ilaveli yakıtların CO_2 değerleri B100'den daha yüksektir. Karışım yakıta 100 ppm B_2O_3 ilavesi, B100'e kıyasla CO_2 emisyonunu azaltmıştır.

Elde edilen sonuçlara göre, alternatif yakıt olarak kullanılabilecek saf biyodizele genel olarak n-oktanol, n-oktanol/MWCNT ve n-oktanol/B_2O_3 nanopartikülleri ilave edilebilir. Ancak, 150 ppm dozda MWCNT'nin filtrelerde tıkanmalara sebep olduğu gözlemlenmiştir. Bu karışımlar kullanılarak CRDI dizel motorlarının motor performansı,

yanma karakteristikleri ve egzoz emisyon özellikleri iyileştirilebilir. Bu karışım yakıtlar dizel motorlarda filtre gözenek çapları değiştirilerek kullanılabilir. Pilot enjeksiyon sistemli motorlarda farklı enjeksiyon stratejileri (enjeksiyon basıncı ve avans gibi) uygulanarak MWCNT ile B_2O_2 katkılı yakıtların atomizasyon ve yanma davranışı hakkında daha fazla araştırmaya ihtiyaç vardır. EGR, turbo, partikül filtresi ve SCR gibi sistemlere sahip günümüz motorlarında da benzer çalışmalar yapılmalıdır. Yakıt filtrelerinin nanopartikül dozajına ve partikül boyutlarına göre tıkanma noktaları araştırılmalıdır. Nanopartikül ilaveli yakıtların ısıtılmasının motor performansı ve yanmaya etkileri incelenmelidir. Aynı zamanda, yakıta nanopartikül ilavesinin motor parçaları üzerindeki uzun vadeli etkileri de araştırılmalıdır.

KAYNAKLAR

Aalam, C.S., Saravanan, C.G., Kannan, M. (2015) Experimental Investigations on a CRDI System Assisted Diesel Engine Fuelled with Aluminium Oxide Nanoparticles Blended Biodiesel. Alexandria Engineering Journal, 54(3), 351-358.

Abed, K.A., El Morsi, A.K., Sayed, M.M., El Shaib, A.A., Gad, M.S. (2018) Effect of Waste Cooking-Oil Biodiesel on Performance and Exhaust Emissions of a Diesel Engine. Egyptian Journal of Petroleum, 27(4), 985-989.

Acaroğlu, M., Ünaldı, M., Aydoğan, H. (2010) Yakıtlar ve Yanma, 1. Basım, Nobel Yayın Dağıtım, Ankara.

Ahmed, A., Shah, A.N., Azam, A., Uddin, G.M., Ali, M.S., Hassan, S., Ahmed, H., Aslam, T. (2020) Environment-Friendly Novel Fuel Additives : Investigation of the Effect of Graphite Nanoparticles on Performance and Regulated Gaseous Emissions of CI Engine. Energy Conversion and Management, 211, 112748.

Akyüz, S. (2019) Jeneratör Tahrikinde Kullanılan Ağır Hizmet Bir Dizel Motorda Oktanolün Dizel veya Biyodizel Kullanımına Etkilerinin Deneysel Olarak Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Batman Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Batman, Türkiye, 25-35.

Al-Dawody, M.F., Edam, M.S. (2022) Experimental and Numerical Investigation of Adding Castor Methyl Ester and Alumina Nanoparticles on Performance and Emissions of a Diesel Engine. Fuel, 307, 121784.

Alenezi, R.A., Norkhizan, A.M., Mamat, R., Erdiwansyah, Najafi, G., Mazlan, M. (2021) Investigating the Contribution of Carbon Nanotubes and Diesel-Biodiesel Blends to Emission and Combustion Characteristics of Diesel Engine. Fuel, 285, 119046.

Alenezi, R.A., Norkhizan, A.M., Rani, H.A., Maulana, M.I., Yasar, M. (2019) An Experimental Investigation of a Diesel Engine Using Carbon Nanotubes Blended with Biodiesel. Materials Science and Engineering, 506, 012048.

Alfaiz, A.M.A., Tahir, M.M., Bakar, R.A., Ali, M.S., Muhaimin, A. (2014) New Design of a Low Cost Small Engine Dynamometer for Engine Testing. Applied Mechanics and Materials, 699, 642-647.

Alptekin, E., Çanakcı, M. (2008) Determination of the Density and the Viscosities of Biodiesel-Diesel Fuel Blends. Renewable Energy, 33(12), 2623-2630.

Alptekin, E. (2013) Hayvansal Atık Yağlardan Biyodizel Üretimi ve Bir Dizel Motorda Kullanımının İncelenmesi. Doktora Tezi, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, Türkiye, 129-131.

Alptekin, E., Şanlı, H., Çanakcı, M. (2019) Combustion and Performance Evaluation of a Common Rail DI Diesel Engine Fueled with Ethyl and Methyl Esters. Applied Thermal Engineering, 149, 180-191.

Amid, S., Aghbashlo, M., Tabatabaei, M., Hajiahmad, A., Najafi, B., Ghaziaskar, H.S., Rastegari, H., Hosseinzadeh-Bandbafha, H., Mohammadi, P. (2020) Effects of Waste-Derived Ethylene Glycol Diacetate as a Novel Oxygenated Additive on Performance and Emission Characteristics of a Diesel Engine Fueled with Diesel/Biodiesel Blends. Energy Conversion and Management, 203, 112245.

Amiri, M., Shirneshan, A. (2020) Effects of Air Swirl on the Combustion and Emissions Characteristics of a Cylindrical Furnace Fueled with Diesel-Biodiesel-n-Butanol and Diesel-Biodiesel-Methanol Blends. Fuel, 268, 117295.

Appavu, P., Madhavan, V.R., Venu, H. (2019) Quaternary Blends of Diesel/Biodiesel/Vegetable Oil/Pentanol as a Potential Alternative Feedstock for Existing Unmodified Diesel Engine : Performance, Combustion and Emission Characteristics. Energy, 186, 115856.

Arbab, M.I., Masjuki, H.H., Varman, M., Kalam, M,A., Sajjad, H., Imtenan S. (2014) Performance and emission characteristics of a diesel engine fueled by an optimum biodiesel-biodiesel blend. RSC Advences, 4, 37122.

Ashok, B., Nanthagopal, K., Anand, V., Aravind, K.M., Jeevanantham, A.K., Balusamy, S. (2019) Effects of n-Octanol as a Fuel Blend with Biodiesel on Diesel Engine Characteristics. Fuel, 235, 363-373.

Aslan, V. (2019) Üretimde Farklı Alkoller ve Katalizörler Kullanılan Biyodizellerin Yakıt Özellikleri, Motor Performansları ve Egzoz Emisyonlarının İncelenmesi. Doktora Tezi, Yozgat Bozok Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yozgat, Türkiye, 128-129.

Atabani, A.E., Kulthoom, A.S. (2020) Spectral, Thermoanalytical Characterizations,

Properties, Engine and Emission Performance of Complementary Biodiesel-Diesel-Pentanol/Octanol Blends. Fuel, 282, 118849.

Atelge, M.R., Arslan, E., Krisa, D., Al-Samaraae, R.R., Abut, S., Ünalan, S., Atabani, A.E., Kahraman, N., Akansu, S.O., Kaya, M., Sarıkoç, S., Kıvrak, H.D. (2022) Comparative Investigation of Multi-Walled Carbon Nanotube Modified Diesel Fuel and Biogas in Dual Fuel Mode on Combustion, Performance, and Emission Characteristics. Fuel, 313, 123008.

Aydın, S. (2014) Yanma Odası Yüzeyleri ZrO_2, MgO ve Al_2O_3 ile Yalıtılmış Bir Dizel Motorunda Biyoyakıt Kullanımının Performans, Emisyon ve Yanma Karakteristiklerine Etkisinin İncelenmesi. Doktora Tezi, Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye, 47-51.

Balaji, G., Cheralathan, M. (2014) Effect of CNT as Additive with Biodiesel on the Performance and Emission Characteristics of a DI Diesel Engine. International Journal of ChemTech Research, 7(3), 1230-1236.

Balki, M.K. (2013) Metanol ve Etanolün Buji Ateşlemeli Bir Motora Uygulanmasında Performans ve Emisyon Parametrelerinin İncelenmesi. Doktora Tezi, Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye, 1-55.

Balki, M.K., Sayın, C., Sarıkaya, M. (2016) Optimization of the Operating Parameters Based on Taguchi Method in an SI Engine Used Pure Gasoline, Ethanol and Methanol. Fuel, 180, 630-637.

Balogh, J.M., Jambor, A. (2018) Determinants of CO_2 Emission : A Global Evidence. International Journal of Energy Economics and Policy, 7, 217-226.

Banapurmath, N.R., Narasimhalu, T.N., Hunashyal, A.M., Sankaran, R., Rabinal, M.H., Ayachit, N., Kittur, R. (2014b) Effect of Silver Nano-Particle Blended Biodiesel and Swirl on the Performance of Diesel Engine Combustion. International Journal of Sustainable and Green Energy, 3(6), 150-157.

Banapurmath, N.R., Sankaran, R., Tumbal, A.V., Narasimhalu, T. N., Hunashyal, A.M., Ayachit, N.H. (2014a) Experimental Investigation on Direct Injection Diesel Engine Fuelled with Graphene, Silver and Multiwalled Carbon Nanotubes-Biodiesel Blended Fuels. International Journal of Automotive Engineering and Technologies, 3(4), 129-138.

Basha, J.S., Anand, R.B. (2013) The Influence of Nano Additive Blended Biodiesel Fuels on the Working Characteristics of a Diesel Engine. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 35, 257-264.

Basha, J.S. (2018) Impact of Carbon Nanotubes and Di-Ethyl Ether as Additives with Biodiesel Emulsion Fuels in a Diesel Engine-An Experimental Investigation. Journal of the Energy Institute, 91(2), 289-303.

Berner, M.K., Zarko, V.E., Talawar, M.B. (2013) Nanoparticles of Energetic Materials : Synthesis and Properties (Review). Combustion, Explosion, and Shock Waves, 49(6), 625-647.

Bhatia, S.K., Bhatia, R.K., Jeon, J.M., Pugazhendhi, A., Awasthi, M.K., Kumar, D., Kumar, G., Yoon, J.J., Yang, Y.H. (2021) An Overview on Advancements in Biobased Transesterification Methods for Biodiesel Production : Oil Resources, Extraction, Biocatalysts, and Process Intensification Technologies. Fuel, 285, 119117.

Borat, O., Balcı, M., Sürmen, A. (1992) İçten Yanmalı Motorlar, Cilt 1, Teknik Eğitim Vakfı Yayınları, Ankara, Türkiye.

Brown, B.R. (2001) Combustion data acquisition and analysis. Final Year Project, Department of Aeronautical Automotive Engineering, Loughborough University, Leicestershire, United Kingdom, 12-45.

Cao, D.N., Hoang, A.T., Luu, H.Q., Bui, V.G., Tran, T.T.H. (2020) Effects of Injection Pressure on the NO_x and PM Emission Control of Diesel Engine : A Review under the Aspect of PCCI Combustion Condition. Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects, ISSN: 7036, 1-18.

Efe, Ş., Ceviz, M.A., Temur, H. (2018) Comparative Engine Characteristics of Biodiesels from Hazelnut, Corn, Soybean, Canola and Sunflower Oils on DI Diesel Engine. Renewable Energy, 119, 142-151.

Chaudhari, V.D., Jagdale, V.S., Chorey, D., Deshmukh, D. (2021) Combustion and Spray Breakup Characteristics of Biodiesel for Cold Start Application. Cleaner Engineering and Technology, 5, 100285.

Chauhan, B.S., Singh, R.K., Cho, H.M., Lim, H.C. (2016) Practice of Diesel Fuel Blends Using Alternative Fuels: A Review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 59,

1358-1368.

Chen, A.F., Adzmi, M.A., Adam, A., Othman, M.F., Kamaruzzaman, M.K., Mrwan, A.G. (2018) Combustion Characteristics, Engine Performances and Emissions of a Diesel Engine Using Nanoparticle-Diesel Fuel Blends with Aluminium Oxide, Carbon Nanotubes and Silicon Oxide. Energy Conversion and Management, 171, 461-477.

Çakmak, A., Özcan, H. (2022) Bor Oksit Nanoparçacıklarının Dizel Yakıt Katkısı Olarak Kullanılabilirliğinin Araştırılması. Journal of Boron, 7(1), 420-429.

Çakmak, A. (2021) Üretilen Farklı Yakıt Katkılarıyla Bir Dizel Motorunun Yanma, Performans ve Emisyon Karaktersitiklerinin İyileştirilmesinin Deneysel İncelenmesi. Doktora Tezi, Ondokuz Mayıs Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Samsun, Tükiye, 135-167.

Çanakcı, M. (2007) Combustion Characteristics of a Turbocharged DI Compression Ignition Engine Fueled with Petroleum Diesel Fuels and Biodiesel. Bioresource Technology, 98(6), 1167-1175.

Çelik, M. (2015) Biyodizel Yakıt Özelliklerinin Motor Performansı ve Emisyon Karakteristiklerine Etkilerinin İncelenmesi. Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, Türkiye, 3-8.

Çengel, Y.A., Boles, M.A. (1996) Mühendislik Yaklaşımıyla Termodinamik, 2. Baskı, McGraw-Hill ve Literatür Yayıncılık, İstanbul, Türkiye.

Çetinkaya, S. (2013) Taşıt Mekaniği, 6. Basım, Nobel Akademik Yayıncılık Eğitim Danışmanlık Tic. Ltd. Şti., Ankara, Türkiye.

Das, S., Kanth, S., Das, B., Debbarma, S. (2022) Experimental Evaluation of Hydrogen Enrichment in a Dual-Fueled CRDI Diesel Engine. International Journal of Hydrogen Energy, 47(20), 11039-11051.

Datta, A., Mandal, B.K. (2017) Engine Performance, Combustion and Emission Characteristics of a Compression Ignition Engine Operating on Different Biodiesel-Alcohol Blends. Energy, 125, 470-483.

Demir, B. (2009) Küçük Ölçekli Bir Biyodizel Sisteminin Oluşturulması, Elde Edilen Pamuk Yağı Metil Esterinin Motor Performans Testleri, Enerjetik ve Ekserjetik

Değerlendirilmesi. Doktora Tezi, Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, Türkiye, 165-167.

Devarajan, Y., Choubey, G., Mehar, K. (2020) Ignition Analysis on Neat Alcohols and Biodiesel Blends Propelled Research Compression Ignition Engine. Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects, 42(23), 2911-2922.

Devarajan, Y., Munuswamy, D.B., Mahalingam, A. (2019) Investigation on Behavior of Diesel Engine Performance, Emission, and Combustion Characteristics Using Nano-Additive in Neat Biodiesel. Heat and Mass Transfer, 55, 1641-1650.

Devarajan, Y., Munuswamy, D.B., Nagappan, B., Pandian, A.K. (2018) Performance, Combustion and Emission Analysis of Mustard Oil Biodiesel and Octanol Blends in Diesel Engine. Heat and Mass Transfer, 54, 1803-1811.

Doğan, O. (2012) Atık Taşıt Lastiğinden Üretilen Pirolitik Yakıtın Bir Dizel Motorda Kullanımının Deneysel Olarak Araştırılması. Doktora Tezi, Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük, Türkiye, 33-43.

Dönmez, N. (2019) İçten Yanmalı Motorlarda Azot Oksit Emisyonlarının Modellenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye, 8-24.

Dueso, C., Munoz, M., Moreno, F., Arroyo, J., Gil-Lalaguna, N., Bautista, A., Gonzalo, A., Sanchez, J.L. (2018) Performance and Emissions of a Diesel Engine Using Sunflower Biodiesel with a Renewable Antioxidant Additive from Bio-Oil. Fuel, 234, 276-285.

Ealias, A.M., Saravanakumar, M.P. (2017) A Review on the Classification, Characterisation, Synthesis of Nanoparticles and Their Application. 14th ICSET IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 263, 032019.

EdwinGeo, V., Fol, G., Aloui, F., Thiyagarajan, S., Stanley, M.J., Sonthalia, A., Brindhadevi, K., Saravanan, C.G. (2021) Experimental Analysis to Reduce CO_2 and Other Emissions of CRDI CI Engine Using Low Viscous Biofuels. Fuel, 283, 118829.

Elkelawy, M., Bastawissi, H.A.E., Esmaeil, K.K., Radwan, A.M., Panchal, H., Sadasivuni, K.K., Ponnamma, D., Walvekar, R. (2019) Experimental Studies on the Biodiesel Production Parameters Optimization of Sunflower and Soybean Oil Mixture and DI Engine Combustion, Performance, and Emission Analysis Fueled with

Diesel/Biodiesel Blends. Fuel, 255, 115791.

El-Seesy, A.I., Abdel-Rahman, A.K., Bady, M., Ookawara, S. (2017) Performance, Combustion, and Emission Characteristics of a Diesel Engine Fueled by Biodiesel-Diesel Mixtures with Multi-Walled Carbon Nanotubes Additives. Energy Conversion and Management, 135, 373-393.

El-Seesy, A.I., Abdel-Rahman, A.K., Bady, M., Ookawara, S. (2016) The Influence of Multi-Walled Carbon Nanotubes Additives into Non-Edible Biodiesel-Diesel Fuel Blend on Diesel Engine Performance and Emissions. Energy Procedia, 100, 166-172.

El-Seesy, A.I., Hassan, H. (2019) Investigation of the Effect of Adding Graphene Oxide, Graphene Nanoplatelet, and Multiwalled Carbon Nanotube Additives with n-Butanol-Jatropha Methyl Ester on a Diesel Engine Performance. Renewable Energy, 132, 558-574.

El-Seesy, A.I., He, Z., Kosaka, H. (2021a) Combustion and Emission Characteristics of a Common Rail Diesel Engine Run with n-Heptanol-Methyl Oleate Mixtures. Energy, 214, 118972.

El-Seesy, A.I., Kosaka, H., Hassan, H., Sato, S. (2019) Combustion and Emission Characteristics of a Common Rail Diesel Engine and RCEM Fueled by n-Heptanol-Diesel Blends and Carbon Nanomaterial Additives. Energy Conversion and Management, 196, 370-394.

El-Seesy, A.I., Waly, M.S., He, Z., El-Batsh, H.M., Nasser, A., El-Zoheiry, R.M. (2021b) Influence of Quaternary Combinations of Biodiesel/Methanol/n-Octanol/Diethyl Ether from Waste Cooking Oil on Combustion, Emission, and Stability Aspects of a Diesel Engine. Energy Conversion and Management, 240, 114268.

El-Seesy, A.I., Waly, M.S., He, Z., El-Batsh, H.M., Nasser, A., El-Zoheiry, R.M. (2022) Enhancement of the Combustion and Stability Aspects of Diesel Methanol-Hydrous Methanol Blends Utilizing n-Octanol, Diethyl Ether, and Nanoparticle Additives. Journal of Cleaner Production, 371, 133673.

El-Seesy, A.I, Xuan, T., He, Z., Hassan, H. (2020) Enhancement the Combustion Aspects of a CI Engine Working with Jatropha Biodiesel/Decanol/Propanol Ternary Combinations. Energy Conversion and Management, 226, 113524.

Erdoğan, S., Balki, M.K., Aydın, S., Sayın, C. (2020) Performance, Emission and Combustion Characteristic Assessment of Biodiesels Derived from Beef Bone Marrow in a Diesel Generator. Energy, 207, 118300.

Erdoğan, S. (2019) Bitkisel ve Hayvansal Biyodizel Kullanılan Bir Dizel Motorun Performans, Emisyon ve Yanma Karakteristiklerinin Çok Kriterli Karar Verme Yöntemleri ile İncelenmesi. Doktora Tezi, Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye, 51-59.

Esteban, B., Riba, J.R., Baquero, G., Puig, R., Rius, A. (2012) Characterization of the Surface Tension of Vegetable Oils To Be Used as Fuel in Diesel Engines. Fuel, 102, 231-238.

Ettefaghi, E., Ghobadian, B., Rashidi, A., Najafi, G., Khoshtaghaza, M.H., Rashtchi, M., Sadeghian, S. (2018) A Novel Bio-Nano Emulsion Fuel Based on Biodegradable Nanoparticles to Improve Diesel Engines Performance and Reduce Exhaust Emissions. Renewable Energy, 125, 64-72.

Fadhil, A.B., Ahmed, A.I. (2016) Ethanolysis of Fish Oil via Optimized Protocol and Purification by Dry Washing of Crude Ethyl Esters. Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers, 58, 71-83.

Fayaz, H., Mujtaba, M.A., Soudagar, M.E.M., Razzaq, L., Nawaz, S., Nawaz, M.A., Farooq, M., Afzal, A., Ahmed, W., Khan, T.M.Y., Bashir, S., Yaqoob, H., El-Seesy, A.I., Wageh, S., Al-Ghamdi, A., Elfasakhany, A. (2021) Collective Effect of Ternary Nano Fuel Blends on the Diesel Engine Performance and Emissions Characteristics. Fuel, 293, 120420.

Ferrier, D.C. ve Honeychurch, K.C. Carbon Nanotube (CNT) – Based Biosensors. Biosensors, 11, 486.

Ferguson, C.R., Kirkpatrick, A.T. (2016) International Combustion Engines Applied Thermosciences, Third Edition, John Wiley and Sons, Ltd, USA.

Gad, M.S., Ağbulut, Ü., Afzal, A., Panchal, E., Jayaraj, S., Qasem, N.A.A., El-Shafay, A.S. (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.

Gad, M.S., El-Seesy, A.I., Radwan, A., He, Z. (2020) Enhancing the Combustion and

Emission Parameters of a Diesel Engine Fueled by Waste Cooking Oil Biodiesel and Gasoline Additives. Fuel, 269, 117466.

Gad, M.S., Gadow, S.I. (2020) Enhancement of Combustion Characteristics and Emissions Reductions of a Diesel Engine Using Biodiesel and Carbon Nanotube. Fullerenes, Nanotubes and Carbon Nanostructures, 29(4), 267-279.

Gad, M.S., Jayaraj, S. (2020) A Comparative Study on the Effect of Nano-Additives on the Performance and Emissions of a Diesel Engine Run on Jatropha Biodiesel. Fuel, 267, 117168.

Gad, M.S., Kamel, B.M., Badruddin, I.A. (2021) Improwing the Diesel Engine Performance, Emissions and Combustion Characteristics Using Biodiesel with Carbon Nanomaterials. Fuel, 288, 119665.

Gan, Y., Lim, Y.S., Qiao, L. (2012) Combustion of Nanofluid Fuels with the Addition of Boron and Iron Particles at Dilute and Dense Concentrations. Combustion and Flame, 159(4), 1732-1740.

Gao, T., Li, C., Zhang, Y., Yang, M., Jia, D., Jin, T., Hou, Y., Li, R. (2019) Dispersing Mechanism and Tribological Performance of Vegetable Oil-Based CNT Nanofluids with Different Surfactants. Tribology International, 131, 51-63.

Geng, P., Cao, E., Tan, Q., Wei, L. (2017) Effects of Alternative Fuels on the Combustion Characteristics and Emission Products from Diesel Engines : A Review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 71, 523-534.

Ge, S., Brindhadevi, K., Xia, C., Khalifa, A.S., Elfasakhany, A., Unpaprom, Y., Doan, H.V. (2022) Enhancement of the Combustion, Performance and Emission Characteristics of Spirulina Microalgae Biodiesel Blends Using Nanoparticles. Fuel, 308, 121822.

Ghanbari, M., Najafi, G., Ghobadian, B., Yusaf, T., Carlucci, A.P., Kiani, M.K.D. (2017) Performance and Emission Characteristics of a CI Engine Using Nano Particles Additives in Biodiesel-Diesel Blends and Modeling with GP Approach. Fuel, 202, 699-716.

Gurusala, N.K, Selvan, V.A.M. (2015) Effects of Alumina Nanoparticles in Waste Chicken Fat Biodiesel on the Operating Characteristics of a Compression Ignition Engine. Clean Technologies and Environmental Policy, 17, 681-692.

Gülüm, M. (2023) Dizel Yakıtı-Bitkisel Yağ-Dietilen Glikol Dimetil Eter Karışım Yakıtlarının Bir Dizel Motorun Performans, Yanma ve Emisyon Karakteristiklerine Etkilerinin İncelenmesi. Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 12, 551-565.

Gümüş, M., Sayın, C., Çanakcı, M. (2012) The Impact of Fuel Injection Pressure on the Exhaust Emissions of a Direct Injection Diesel Engine Fueled with Biodiesel-Diesel Fuel Blends. Fuel, 95, 486-494.

Hasan, A.O., Osman, A.I., Al-Muhtasep, A.H., Al-Rawashdeh, H., Abu-Jrai, A., Ahmad, R., Gomaa, M.R., Deka,T.J., Rooney, D.W. (2021) An Experimental Study of Engine Characteristics and Tailpipe Emissions from Modern DI Diesel Engine Fuelled with Methanol/Diesel Blends. Fuel Processing Technology, 220, 106901.

Heydari-Maleney, K., Taghizadeh-Alisaraei, A., Ghobadian, B., Abbaszadeh-Mayvan, A. (2017) Analyzing and Evaluation of Carbon Nanotubes Additives to Diesohol-B2 Fuels on Performance and Emission of Diesel Engines. Fuel, 196, 110-123.

Heywood, J.B. (1988) Internal Combusition Engine Fundamentals, MeGRAW-HIL, U.S.A., New York.

Hoang, A.T., Le, M.X., Nizetic, S., Huang, Z., Ağbulut, Ü., Veza, I., Said, Z., Le, A.T., Tran, V.D., Nguyen, X.P. (2022) Understanding Behaviors of Compression Ignition Engine Running on Metal Nanoparticle Additives-Included Fuels : A Control Comparison between Biodiesel and Diesel Fuel. Fuel, 326, 124981.

Hosseini, S.H., Taghizadeh-Alisaraei, A., Ghobadian, B., Abbaszadeh-Mayvan, A. (2017) Performance and Emission Characteristics of a CI Engine Fuelled with Carbon Nanotubes and Diesel-Biodiesel Blends. Renewable Energy, 111, 201-213.

How, H.G., Masjuki, H.H., Kalam, M.A., Teoh, Y.H. (2018) Influence of Injection Timing and Split Injection Strategies on Performance, Emissions, and Combustion Characteristics of Diesel Engine Fueled with Biodiesel Blended Fuels. Fuel, 213, 106-114.

Jiang, L., Wang, Y.D., Roskilly, A.P., Xie, X.L., Zhang, Z.C., Wang, R.Z. (2018) Investigation on Thermal Properties of a Novel Fuel Blend and Its Diesel Engine Performance. Energy Conversion and Management, 171, 1540-1548.

Jin, C., Wei, J. (2023) The Combined Effect of Water and Nanoparticles on Diesel Engine Powered by Biodiesel and Its Blends with Diesel : A Review. Fuel, 343, 127940.

Joy, N., Devarajan, Y., Nagappan, B., Anderson, A. (2018) Exhaust Emission Study on Neat Biodiesel and Alcohol Blends Fueled Diesel Engine. Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects, 40(1), 115-119.

Kaisan, M.U., Pam, G.Y. (2013) Determination of Engine Performance Parameters of a Stationary Single Cylinder Compression Ignition Engine Run on Biodiesel from Wild Grape Seeds/Diesel Blends. Journal of Energy, Environment and Carbon Credits, 3(3), 15-21.

Kangallı, E. (2022) Poli (Laktik Asit) (PLA)/Bor Oksit (B_2O_3) Nanokompozit Sentezi ve Karakterizasyonu. Doktora Tezi, Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 45-46.

Karaca, C. (2021) Design and Application of a Low Soot Emission Targeted Combustion Chamber for Diesel Engines. Master of Science Thesis, Yildiz Technical University, Graduate School of Science and Engineering, Istanbul, Turkey, 15-16.

Karahan, Ş. (2011) Biyodiesel ile Çalışan Diesel Motorunda ECFM-3Z (Extended Coherent Flame Model-3 Zones) Modelinin Performans ve Emisyon Simülasyonuna Yaklaşımı. Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye, 7-16.

Karthikeyan, S. Prabhakaran, T.D. (2018) Emission Analysis of Botryococcus Braunii Algal Biofuel Using Ni-Doped ZnO Nano Additives for IC Engines. Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects, 40(9), 1060-1067.

Karthikeyan, S., Prathima, A. (2016) Emission Analysis of the Effect of Doped Nano-Additives on Biofuel in a Diesel Engine. Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects, 38(24), 3702-3708.

Kaya, T. (2019) Experimental Combustion Analysis of Diesel Engine. PhD Thesis, Istanbul Technical University Department of Mechanical Engineering Mechanical Engineering Programme, İstanbul, Türkiye, 4-7.

Kegl, T., Kralj, A.K., Kegl, B., Kegl, M. (2021) Nanomaterials as Fuel Additives in Diesel Engines : A Review of Current State, Opportunities, and Challenges. Progress in

Energy and Combustion Science, 83, 100897.

Khan, S., Dewang, Y., Raghuwanshi, J., Shrivastava, A., Sharma, V. (2022) Nanoparticles as Fuel Additive for Improving Performance and Reducing Exhaust Emissions of Internal Combustion Engines. International Journal of Environmental Analytical Chemistry, 102(2), 319-341.

Kishore, N.P., Gugulothu, S.K. (2022) Effect of Iron Oxide Nanoparticles Blended Concentration on Performance, Combustion and Emission Characteristics of CRDI Diesel Engine Running on Mahua Methyl Ester Biodiesel. Journal of The Institution of Engineers (India): Series C, 103(2), 167-180.

Klippenstein, S.J., Harding, L.B., Glarborg, P., Miller, J.A. (2011) The Role of NNH in NO Formation and Control. Combustion and Flame, 158(4), 774-789.

Koncuk, F. (2008) Biyodizel Üretimi ve Dizel Motorunda Motor-Yanma Karakteristiklerinin İncelenmesi. Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum, Türkiye, 76-96.

Krupakaran, R.L., Hariprasasd, T., Gopalakrishna, A., Babu, P. (2016) The Performance and Exhaust Emissions Investigation of a Diesel Engine Using γ-Al_2O_3 Nanoparticle Additives to Biodiesel. Carbon Management, 7(3-4), 233-241.

Kshirsagar, C.M., Anand, R. (2017) Artificial Neural Network Applied Forecast on a Parametric Study of Calophyllum Inophyllum Methyl Ester-Diesel Engine out Responses. Applied Energy, 189, 555-567.

Kumar, B.R., Saravanan, S., Rana, D., Anish, V., Nagendran, A. (2016) Effect of a Sustainable Biofuel-n-Octanol-on the Combustion, Performance and Emissions of a DI Diesel Engine under Naturally Aspirated and Exhaust Gas Recirculation (EGR) Modes. Energy Conversion and Management, 118, 275-286.

Kumar, S., Dinesha, P., Ajay, C.M., Kabbur, P. (2020) Combined Effect of Oxygenated Liquid and Metal Oxide Nanoparticle Fuel Additives on the Combustion Characteristics of a Biodiesel Engine Operated with Higher Blend Percentages. Energy, 197, 117194.

Küçükosman, R., Yontar, A.A., Ocakoglu, K. (2022) Nanoparticle Additive Fuels: Atomization, Combustion and Fuel Characteristics. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 165, 105575.

Kül, V.S. ve Akansu, S.O. (2022) Experimental Investigation of the Impact of Boron Nanoparticles and CNG on Performance and Emissions of Heavy-Duty Diesel Engines. Fuel, 324, 124470.

Lee, C.C., Tran, M.V., Tan, B.T., Scribano, G., Chong, C.T. (2021) A Comprehensive Review on the Effects of Additives on Fundamental Combustion Characteristics and Pollutant Formation of Biodiesel and Ethanol. Fuel, 288, 119749.

Lv, J., Wang, S., Meng, B. (2022) The Effects of Nano-Additives Added to Diesel-Biodiesel Fuel Blends on Combustion and Emission Characteristics of Diesel Engine : A Review. Energies, 15(3), 1032.

Manieniyan, V., Senthilkumar, R., Sukumar, V. (2021) Study on Diesel Engine Characteristics Using Multi-Walled Carbon Nanotubes Blended Thermal Cracked Vegetable Oil Refining Waste. Materials Today: Proceedings, 37, 3665-3672.

Manigandan, S., Gunasekar, P., Nithya, S., Devipriya, J. (2020) Effects of Nanoadditives on Emission Characteristics of Engine Fuelled with Biodiesel. Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects, 42(1), 1-9.

Mehta, R.N., Chakraborty, M., Parikh, P.A. (2014) Nanofuels: Combustions, Engine, Performance and Emissions. Fuel, 120, 91-97.

Mei, D., Zuo, L., Adu-Mensah, D., Li, X., Yuan, Y. (2019) Combustion Characteristics and Emissions of a Common Rail Diesel Engine Using Nanoparticle-Diesel Blends with Carbon Nanotube and Molybdenum Trioxide. Applied Thermal Engineering, 162, 114238.

Mert, S. (2020) Termal Bariyer Kaplı Bir Dizel Motorda Biyodizelin Yanmaya Olan Etkilerinin İncelenmesi. Doktora Tezi, Düzce Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Düzce, Türkiye, 32-38.

Mikulski, M., Duda, K., Wierzbicki, S. (2016) Performance and Emissions of a CRDI Diesel Engine Fuelled with Swine Lard Methyl Esters-Diesel Mixture. Fuel, 164, 206-219.

Mujtaba, M.A., Cho, H.M., Masjuki, H.H., Kalam, M.A., Farooq, M., Soudagar, M.E.M., Gul, M., Afzal, A., Ahmed, W., Raza, A., Khan, T.M.Y., Bashir, S., Ahmad, Z. (2021) Effect of Primary and Secondary Alcohols as Oxygenated Additives on the Performance

and Emission Characteristics of Diesel Engine. Energy Reports, 7, 1116-1124.

Mujtaba, M.A., Kalam, M.A., Masjuki, H.H., Gul, M., Soudagar, M.E.M., Ong, H.C., Ahmed, W., Atabani, A.E., Razzaq, L., Yusoff, M. (2020) Comparative Study of Nanoparticles and Alcoholic Fuel Additives-Biodiesel-Diesel Blend for Performance and Emission Improvements. Fuel, 279, 118434.

Nabi, M.N., Rahman, M.M., Akhter, M.S. (2009) Biodiesel from Cotton Seed Oil and Its Effect on Engine Performance and Exhaust Emissions. Applied Thermal Engineering, 29(11-12), 2265-2270.

Nabi, M.N., Rasul, M.G., Anwar, M., Mullins, B.J. (2019) Energy, Exergy, Performance, Emission and Combustion Characteristics of Diesel Engine Using New Series of Non-Edible Biodiesels. Renewable Energy, 140, 647-657.

Naik, J.V., Kumar, K.K. (2018) Performance and Emission Characteristics of Diesel Engines with Al_2O_3 and CuO Nanoparticles as Additives. International Journal of Mechanical Engineering and Technology, 9(2), 791-798.

Najafi, G. (2018) Diesel Engine Combustion Characteristics Using Nano-Particles in Biodiesel-Diesel Blends. Fuel, 212, 668-678.

Nanthagopal, K., Ashok, B., Saravanan, B., Patel, D., Sudarshan, B., Ramasamy, R.A. (2018) An Assessment on the Effects of 1-Pentanol and 1-Butanol as Additives with Calophyllum Inophyllum Biodiesel. Energy Conversion and Management, 158, 70-80.

Nanthagopal, K., Kishna, R.S., Atabani, A.E., Al-Muhtaseb, A.H., Kumar, G., Ashok, B. (2020) A Compressive Review on the Effects of Alcohols and Nanoparticles as an Oxygenated Enhancer in Compression Ignition Engine. Energy Conversion and Management, 203, 112244.

Ninawe, G., Tariq, M. (2020a) Impact of Carbon Nanotubes as Additives with Cotton Seed Biodiesel Blended with Diesel in CI Engine-An Experimental Analysis. Nature Environment and Pollution Technology, 19(1), 211-219.

Ninawe, G., Tariq, M. (2020b) Influence of Carbon Nanotubes as Additive in Diesel-Biodiesel Blends in CI Engine-An Experimental Investigation. International Journal of Sustainable Engineering, 14(5), 1110-1121.

Ning, L., Duan, Q., Chen, Z., Kou, H., Liu, B., Yang, B., Zeng, K. (2020) A Comparative Study on the Combustion and Emissions of a Non-Road Common Rail Diesel Engine Fueled with Primary Alcohol Fuels (Methanol, Ethanol, and n-Butanol)/Diesel Dual Fuel. Fuel, 266, 117034.

Nour, M., EL-Seesy, A.I., Abdel-Rahman, A.K., Bady, M. (2018) Influence of Adding Aluminum Oxide Nanoparticles to Diesterol Blends on the Combustion and Exhaust Emission Characteristics of a Diesel Engine. Experimental Thermal and Fluid Science, 98, 634-644.

Nutakki, P.K., Gugulothu, S.K. (2022) Influence of the Effect of Nanoparticle Additives Blended with Mahua Methyl Ester on Performance, Combustion, and Emission Characteristics of CRDI Diesel Engine. Environmental Science and Pollution Research, 29, 70-81.

Nutakki, P.K., Gugulothu, S.K., Ramachander, J., Sivasurya, M. (2022) Effect of n-Amyl Alcohol/Biodiesel Blended Nano Additives on the Performance, Combustion and Emission Characteristics of CRDi Diesel Engine. Environmental Science and Pollution Research, 29, 82-97.

Olgun, M. (2010) Tek Silindirli Bir Dizel Motorun Atalet Kuvvetlerinin Analizi ve Dengeleme Hesaplamaları. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye, 11-13.

Ooi, J.B., Kau, C.C., Manoharan, D.N., Wang, X., Tran, M.V., Hung, Y.M. (2023) Effects of Multi-Walled Carbon Nanotubes on the Combustion, Performance, and Emission Characteristics of a Single-Cylinder Diesel Engine Fueled with Palm-Oil Biodiesel-Diesel Blend. Energy, 281, 128350.

Özgür, C. (2015) Development of a NO_x Reduction System for Diesel Engines. PhD Thesis, Çukurova University Institute of Natural and Applied Sciences, Adana, Turkey, 25-34.

Özsezen, A.N. (2007) Atık Palmiye Yağından Üretilen Biyodizelin Motor Performans ve Emisyon Karakterleri Üzerine Etkisinin İncelenmesi. Doktora Tezi, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, Türkiye, 67-125.

Özsezen, A.N. (2022) Influence of Pilot Fuel Injection and Boost Air Pressure on

Combustion Characteristics in Diesel Engine Fueled with Ethanol-Butan-2-Ol-Fossil Diesel Blends. Fuel, 314, 123081.

Pesić, R.B., Davinić, A.L., Petković, S.D., Taranović, D.S., Miloradović, D.M. (2013) Aspects of Volumetric Efficiency Measurement for Reciprocating Engines. Thermal Science, 7(1), 35-48.

Prasad, K.B., Meduri, O., Raju, V.D., Azmeera, A.K., Venu, H., Subramani L., Soudagar, M.E.M. (2020) Effect of Split Fuel Injection Strategies on the Diverse Characteristics of CRDI Diesel Engine Operated with Tamarind Biodiesel. Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects, 1-19.

Praveen, A., Rani, G.J., Balakrishna, B. (2022) Effect of MWCNTs as Nano Additives in C. Inophyllum Biodiesel Blend (CIB20) on the Performance and Emission Parameters of a Diesel Engine. Materials Today: Proceedings, 50, 2581-2586.

Putrasari, Y., Lim, O. (2017) A Study on Combustion and Emission of GCI Engines Fueled with Gasoline-Biodiesel Blends. Fuel, 189, 141-154.

Qi, D.H., Yang, K., Zhang, D., Chen, B. (2017) Combustion and Emission Characteristics of Diesel-Tung Oil-Ethanol Blended Fuels Used in a CRDI Diesel Engine with Different Injection Strategies. Applied Thermal Engineering, 111, 927-935.

Rafique, I., Kausar, A., Anwar, Z., Muhammad, B. (2015) Exploration of Epoxy Resins, Hardening Systems and Epoxy/Carbon Nanotube Composite Designed for High Performance Materials: A Review. Polymer-Plastics Technology and Engineering, 55(3), 312-333.

Rajak, U., Nashine, P., Verma, T.N. (2019) Characteristics of Microalgae Spirulina Biodiesel with the Impact of n-Butanol Addition on a CI Engine. Energy, 189, 116311.

Raju, V.D., Kishore, P.S., Nanthagopal, K., Ashok, B. (2018) An Experimental Study on the Effect of Nanoparticles with Novel Tamarind Seed Methyl Ester for Diesel Engine Applications. Energy Conversion and Management, 164, 655-666.

Ramakrishnan, G., Krishnan, P., Rathinam, S., Thiyagu, R., Devarajan, Y. (2019) Role of Nano-Additive Blended Biodiesel on Emission Characteristics of the Research Diesel Engine. International Journal of Green Energy, 16(6), 435-441.

Ramalingam, S., Babu, M.N., Devarajan, Y., Babu, M.D., Varuvel, E.G. (2023) Environmental and Energy Valuation of Wastederived Cymbopogon Martinii Methyl Ester Combined with Multi-Walled Carbon (MWCNTs) Additives in Hydrogen-Enriched Dual Fuel Engine, International Journal of Hydrogen Energy, In Press.

Rangabashiam, D., Jayaprakash, V., Ganesan, S., Christopher, D. (2019) Investigation on the Performance, Emission and Combustion Pattern of Research Diesel Engine Fueled with Higher Alcohol and Pongamia Biodiesel Blends. Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects, 45(2), 4777-4788.

Rangabashiam, D., Rathinam, S., Subbiah, G., Sajin, J.B., Babus, S. (2020) Emission Behaviour Studies on the Cause of ZnO Nanoparticle Inclusion in Neat Biodiesel. Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects, 42(16), 1989-1996.

Razak, N.H., Hashim, H., Yunus, N.A., Klemes, J.J. (2021) Reducing Diesel Exhaust Emissions by Optimisation of Alcohol Oxygenates Blend with Diesel/Biodiesel. Journal of Cleaner Production, 316, 128090.

Razek, S.M.A., Gad, M.S., Thabet, O.M. (2017) Effect of Aluminum Oxide Nano-Particle in Jatropha Biodiesel on Performance, Emissions and Combusion Characteristics of DI Diesel Engine. International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology, 5(4), 358-372.

Reşitoğlu, İ.A. (2016) Dizel Motorlarda Kirletici Emisyonların Kontrol Edilmesine Yönelik Fe_2O_3 Esaslı Katalizörlerin Kullanıldığı DOC ve SCR Sistemlerinin Geliştirilmesi. Doktora Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, Türkiye, 8-11.

Safa, A. (2006) İçten Yanmalı Motorlarda Proses ve Emisyon Modellemesi. Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye, 60-61.

Sanli, H., Alptekin, E., Canakci M. (2022) Using Low Viscosity Micro-Emulsification Fuels Composed of Waste Frying Oil-Diesel Fuel-Higher Bio-Alcohols in A Turbocharged-CRDI Diesel Engine. Fuel, 308, 121966.

Sarıkoç, S. (2019) Biyodizel-Bütanol-Dizel Karışımlarına Hidrojen ve Titanyum Dioksit İlavesinin Performans ve Emisyon Parametrelerine Etkilerinin Araştırılması. Doktora Tezi, Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri, Türkiye, 100-101.

Sateesh, K.A., Yaliwal, V.S., Banapurmath, N.H., Soudagar, M.E.M., Yunus Khan, T.M., Harari, P.A., El-Shafay, A.S., Mujtaba, M.A., Elfaskhany, A., Kalam, M.A. (2023) Effect of MWCNTs Nano-Additive on a Dual-Fuel Engine Characteristics Utilizing Dairy Scum Oil Methyl Ester and Producer Gas. Case Studies in Thermal Engineering, 42, 102661.

Sathiyamoorthi, R., Sankaranarayanan, G., Pitchandi, K. (2017) Combined Effect of Nanoemulsion and EGR on Combustion and Emission Characteristics of Neat Lemongrass Oil (LGO)-DEE-Diesel Blend Fuelled Diesel Engine. Applied Thermal Engineering, 112, 1421-1432.

Saxena, V., Kumar, N., Saxena, V.K. (2017) A Comprehensive Review on Combustion and Stability Aspects of Metal Nanoparticles and Its Additive Effect on Diesel and Biodiesel Fuelled C.I. Engine. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 70, 563-588.

Sayın, C., Balki, M.K., Erdoğan, S. (2020) Taşıt Emisyonları ve Kontrolü, 1. Basım, Nobel Akademik Yayıncılık, Ankara.

Sayın, C. (2010) Engine Performance and Exhaust Gas Emissions of Methanol and Ethanol-Diesel Blends. Fuel, 89(10), 3410-3415.

Sayın, C., Erdoğan, S., Balki, M.K. (2021) Alternatif Yakıtlar, 2. Basım, Nobel Akademik Yayıncılık, Ankara.

Sayın, C., Gümüş, M., Çanakcı, M. (2012) Effect of Fuel Injection Pressure on the Injection, Combustion and Performance Characteristics of a DI Diesel Engine Fueled with Canola Oil Methyl Esters-Diesel Fuel Blends. Biomass and Bioenergy, 46, 435-446.

Sayın, C., Gümüş, M., Çanakcı, M. (2013) Influence of Injector Hole Number on the Performance and Emissions of a DI Diesel Engine Fueled with Biodiesel-Diesel Fuel Blends. Applied Thermal Engineering, 61(2), 121-128.

Sekar, M.S.C., Ananthan, V.R., Baskaran, N., Kumar, H.K.S., Arumugam, R. (2020) Combustion, Performance, and Emission Study on the Octanol-Neem Biodiesel Blends Fueled Diesel Engine. Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects, 1-13.

Selvan, V.A.M., Anand, R.B., Udayakumar, M. (2014) Effect of Cerium Oxide Nanoparticles and Carbon Nanotubes as Fuel-Borne Additives in Diesterol Blends on the Performance, Combustion and Emission Characteristics of a Variable Compression Ratio

Engine. Fuel, 130, 160-167.

Semakula, M., Inambao, F. (2018) The Formation, Effects and Control of Oxides of Nitrogen in Diesel Engines. International Journal of Applied Engineering Research, 13(6), 3200-3209.

Seraç, M.R., Aydın, S., Sayın, C. (2020) Comprehensive Evaluation of Performance, Combustion, and Emissions of Soybean Biodiesel Blends and Diesel Fuel in a Power Generator Diesel Engine. Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects, 42(18), 2316-2331.

Sharma, S.K., Das, R.K., Sharma, A. (2016) Improvement in the Performance and Emission Characteristics of Diesel Engine Fueled with Jatropha Methyl Ester and Tyre Pyrolysis Oil by Addition of Nano Additives. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 38, 1907-1920.

Shau, D., Sutar, H., Senapati, P., Murmu, R., Roy, D. (2021) Graphene, Graphene-Derivatives and Composites: Fundamentals, Synthesis Approaches to Applications. Journal of Composites Science, 5, 181.

Shrivastava, P., Verma, T.N. (2020) Effect of Fuel Injection Pressure on the Characteristics of CI Engine Fuelled with Biodiesel from Roselle Oil. Fuel, 265, 117005.

Sithard, Kumar, N. (2020) Performance and Emission Studies of Ternary Fuel Blends of Diesel, Biodiesel and Octanol. Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects, 42(18), 2277-2296.

Solmaz, H., Calam, A., Yılmaz, E., Şahin, F., Ardebili, S.M.S., Aksoy, F. (2023) Evaluation of MWCNT as Fuel Additive to Diesel-Biodiesel Blend in a Direct Injection Diesel Engine. Biofuels, 14(2), 147-156.

Soudagar, M.E.M., Afzal, A., Safaei, M.R., Manokar, A.M., El-Seesy, A.I., Mujtaba, M.A., Samuel, O.D., Badruddin, I.A., Ahmed, W., Shahapurkar, K., Goodarzi, M. (2020) Investigation on the Effect of Cottonseed Oil Blended with Different Percentages of Octanol and Suspended MWCNT Nanoparticles on Diesel Engine Characteristics. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 147, 525-542.

Soudagar, M.E.M., Nik-Ghazali, N.N., Kalam, M.A., Badruddin, I.A., Banapurmath, N.R., Akram, N. (2018) The Effect of Nano-Additives in Diesel-Biodiesel Fuel Blends :

A Comprehensive Review on Stability, Engine Performance and Emission Characteristics. Energy Conversion and Management, 178, 146-177.

Söyler, H., Balki, M.K., Sayın, C. (2021) Determination of Optimum Parameters for Esterification in High Free Fatty Acid Olive Oil and Ultrasound-Assisted Biodiesel Production. Biomass Conversion and Biorefinery, (0123456789).

Srinidhi, C., Madhusudhan, A. (2017) A Diesel Engine Performance Investigation Fuelled with Nickel Oxide Nano Fuel-Methyl Ester. International Journal of Renewable Energy Research, 7(2), 676-681.

Sunil, S., Prasad, B.S.C., Kotresh, M., Kakkeri, S. (2019) Studies on Suitability of Multiwalled CNT as Catalyst in Combustion on a CI Engine Fueled with Dairy Waste Biodiesel Blends. Materials Today: Proceedings, 26, 613-619.

Sürer, E. (2020) Dize-Biyodizel Karışımına Metalik Esaslı Karbon Nanotüp Katkı Maddesi İlavesinin Motor Performansı ve Egzoz Emisyonlarına Etkisinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, Türkiye, 47-57.

Sürmen, A., Karamangil, A.İ., Arslan, R. (2019) Motor Termodinamiği, 3. Baskı, Aktüel BasımYayım Dağıtım, Bursa, Türkiye.

Şanlı, A., Yılmaz, İ.T., Gümüş, M. (2018) Bir Dizel Motorda Farklı Yük ve Sıkıştırma Oranlarında Metan ve Metan/Hidrojen Karışımları Kullanımında Yanma Karakteristiklerinin Deneysel Analizi. 14th International Combustion Symposium, 25-27 Nisan, Erzurum.

Şengün, H.İ. (2014) Motorlar Yapı ve Hesabı, 2. Baskı, Umuttepe Yayınları, Kocaeli, Türkiye.

Tomar, M., Kumar, N. (2020) Effect of Multi-Walled Carbon Nanotubes and Alumina Nano-Additives in a Light Duty Diesel Engine Fuelled with Schleichera Oleosa Biodiesel Blends. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 42, 100833.

Türkcan, A. (2006) Bir Dizel Motorun Performans Parametrelerinin Deneysel Tespiti. Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, Türkiye, 10-22.

Uyaroğlu, A. (2015) Crambe Tohumlarından Biyodizel Üretimi ve Dizel Motorlarında

Alternatif Yakıt Olarak Kullanımı. Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, Türkiye, 34-35.

Varatharajan, K., Cheralathan, M. (2012) Influence of Fuel Properties and Composition on NO_x Emissions from Biodiesel Powered Diesel Engines: A Review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 16(6), 3702-3710.

Vargün, M., Özsezen, A.N., Türkcan, A., Sayın, C., Kılıçaslan, İ. (2023) Effects of Supercharge Pressure on Combustion Characteristics of a Diesel Engine Fueled with Alcohol–Diesel Blends. Arabian Journal for Science and Engineering, 48, 12029-12042.

Vellaiyan, S. (2019) Enhancement in Combustion, Performance, and Emission Characteristics of a Diesel Engine Fueled with Diesel, Biodiesel, and Its Blends by Using Nanoadditive. Environmental Science and Pollution Research, 26, 9561-9573.

Vellaiyan, S., Partheeban, C.M.A. (2020) Combined Effect of Water Emulsion and ZnO Nanoparticle on Emissions Pattern of Soybean Biodiesel Fuelled Diesel Engine. Renewable Energy, 149, 1157-1166.

Venu, H., Appavu, P. (2019) Experimental Studies on the Influence of Zirconium Nanoparticle on Biodiesel-Diesel Fuel Blend in CI Engine. International Journal of Ambient Energy, 42(14), 1588-1594.

Wang, T., Liu, J., Sun, P., Ji, Q., Gao, W., Yang, C. (2020) Influence of Injection Parameters on Combustion, Gaseous Emissions and Particle Size Distribution of a CRDI Diesel Engine Operating with PODE/Diesel Blends. Fuel, 281, 118733.

Wang, Q., Ni, J., Huang, R. (2022) The Potential of Oxygenated Fuels (n-Octanol, Methylal, and Dimethyl Carbonate) as an Alternative Fuel for Compression Ignition Engines with Different Load Conditions. Fuel, 309, 122129.

Wang, X., Dai, M., Xie, Y., Han, J., Ma,Y., Chen, C. (2020) Experimental Investigation of Evaporation Characteristics of Biodiesel-Diesel Blend Droplets with Carbon Nanotubes and Nanoceria as Nanoadditives. Applied Surface Science, 505, 144186.

Wu, Q., Xie, X., Wang, Y., Roskilly, T. (2017) Experimental Investigations on Diesel Engine Performance and Emissions Using Biodiesel Adding with Carbon Coated Aluminum Nanoparticles. Energy Procedia, 142, 3603-3608.

Yadav, J., Deppenkemper, K., Pischinger, S. (2023) Impact of Renewable Fuels on

Heavy-Duty Engine Performance and Emissions. Energy Reports, 9, 1977-1989.

Yang, L., Zare, A., Bodisco, T.A., Nabi, N., Liu, Z., Brown, R.J. (2021) Analysis of Cycle-to-Cycle Variations in a Common-Rail Compression Ignition Engine Fuelled with Diesel and Biodiesel Fuels. Fuel, 290, 120010.

Yan, J., Gao, S., Zhao, W., Lee, T.H. (2021) Study of Combustion and Emission Characteristics of a Diesel Engine Fueled with Diesel, Butanol-Diesel and Hexanol-Diesel Mixtures under Low Intake Pressure Conditions. Energy Conversion and Management, 243, 114273.

Yaşar, F. (2016) Yosun Yağından Biyodizel Üretimi ve Bir Dizel Motorunda Alternatif Yakıt Olarak Kullanılması. Doktora Tezi, Batman Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Batman, Türkiye, 104-106.

Yılmaz, N. (2012) Comparative Analysis of Biodiesel-Ethanol-Diesel and Biodiesel-Methanol-Diesel Blends in a Diesel Engine. Energy, 40(1), 210-213.

Yılmaz, N., Sanchez, T.M. (2012) Analysis of Operating a Diesel Engine on Biodiesel-Ethanol and Biodiesel-Methanol Blends. Energy, 46(1), 126-129.

Yogaraj, D., Ragothaman, G., Devaraj, A., Udhayakumar, K. (2021) Performance and Emission Characteristics Evaluation of CRDI Engine Using Alternate Fuel. Materials Today: Proceedings, 37, 1893-1896.

Yoon, S.K., Ge, J.C., Choi, N.J. (2019) Influence of Fuel Injection Pressure on the Emissions Characteristics and Engine Performance in a CRDI Diesel Engine Fueled with Palm Biodiesel Blends. Energies, 12(20), 3837.

Yüksek, L. (2013) Dizel Motorlarında Isı Salınımının Azot Oksit Emisyonlarına Etkisinin Teorik ve Deneysel Olarak Araştırılması. Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye, 14-21.

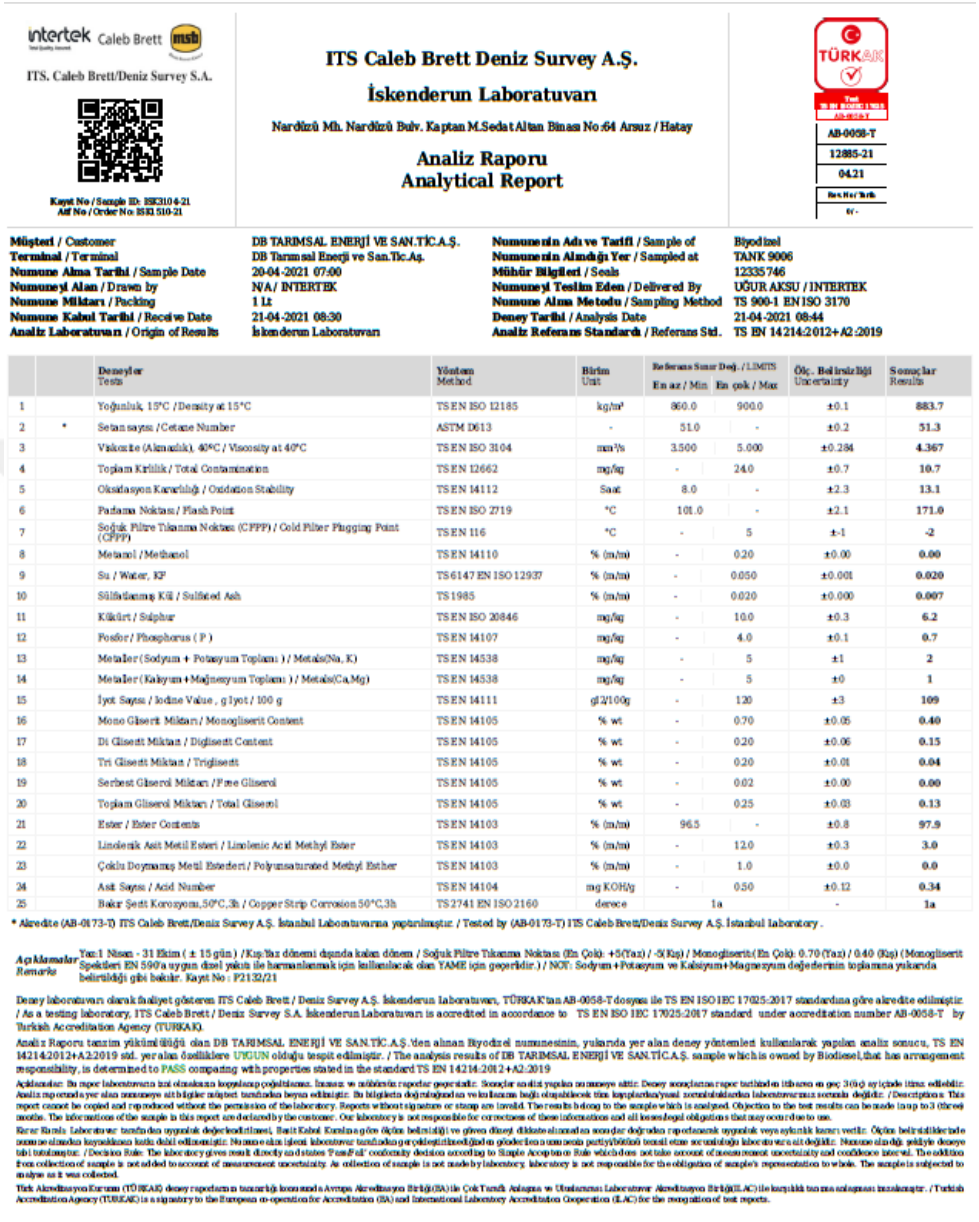
Zare, A., Stevanovic, S., Jafari, M., Verma, P., Babaie, M., Yang, L., Rahman, M.M., Ristovski, Z.D., Brown, R.J., Bodisco, T.A. (2021) Analysis of Cold-Start NO_2 and NO_x Emissions, and the NO_2/NO_x Ratio in a Diesel Engine Powered with Different Diesel-Biodiesel Blends. Environmental Pollution, 290, 118052.

Zhang, T., Nilsson, L.J., Björkholtz, C., Munch, K., Denbratt, I. (2016) Effect of Using

Butanol and Octanol Isomers on Engine Performance of Steady State and Cold Start Ability in Different Types of Diesel Engines. Fuel, 184, 708-717.

EKLER

Ek-1 Biyodizelin analiz sonuçları



ITS. Caleb Brett/Deniz Survey S.A.

Kayıt No / Sample ID: ISK3104-21
Atf No / Order No: ISK1510-21

ITS Caleb Brett Deniz Survey A.Ş.

İskenderun Laboratuvarı

Nardüzü Mh. Nardüzü Bulv. Kaptan M.Sedat Altan Binası No:64 Arsuz / Hatay

Analiz Raporu
Analytical Report

AB-0058-T
12885-21
04.21

Müşteri / Customer	DB TARIMSAL ENERJİ VE SAN.TİC.A.Ş.	**Numunenin Adı ve Tarifi / Sample of**	Biyodizel
Terminal / Terminal	DB Tarımsal Enerji ve San.Tic.Aş.	**Numunenin Alındığı Yer / Sampled at**	TANK 9006
Numune Alma Tarihi / Sample Date	20-04-2021 07:00	**Mühür Bilgileri / Seals**	12335746
Numuneyi Alan / Drawn by	N/A/ INTERTEK	**Numuneyi Teslim Eden / Delivered By**	UĞUR AKSU / INTERTEK
Numune Miktarı / Packing	1 Lt	**Numune Alma Metodu / Sampling Method**	TS 900-1 EN ISO 3170
Numune Kabul Tarihi / Receive Date	21-04-2021 08:30	**Deney Tarihi / Analysis Date**	21-04-2021 08:44
Analiz Laboratuvarı / Origin of Results	İskenderun Laboratuvarı	**Analiz Referans Standardı / Referans Std.**	TS EN 14214:2012+A2:2019

		Deneyler / Tests	Yöntem / Method	Birim / Unit	Referans Sınır Değ. / LIMITS En az / Min.	En çok / Max	Ölç. Belirsizliği / Uncertainty	Sonuçlar / Results
1		Yoğunluk, 15°C / Density at 15°C	TS EN ISO 12185	kg/m³	860.0	900.0	±0.1	883.7
2	*	Setan sayısı / Cetane Number	ASTM D613	-	51.0	-	±0.2	51.3
3		Viskozite (Akmazlık), 40°C / Viscosity at 40°C	TS EN ISO 3104	mm²/s	3.500	5.000	±0.284	4.367
4		Toplam Kirlilik / Total Contamination	TS EN 12662	mg/kg	-	24.0	±0.7	10.7
5		Oksidasyon Kararlılığı / Oxidation Stability	TS EN 14112	Saat	8.0	-	±2.3	13.1
6		Parlama Noktası / Flash Point	TS EN ISO 2719	°C	101.0	-	±2.1	171.0
7		Soğuk Filtre Tıkanma Noktası (CFPP) / Cold Filter Plugging Point (CFPP)	TS EN 116	°C	-	5	±-1	-2
8		Metanol / Methanol	TS EN 14110	% (m/m)	-	0.20	±0.00	0.00
9		Su / Water, KF	TS 6147 EN ISO 12937	% (m/m)	-	0.050	±0.001	0.020
10		Sülfatlanmış Kül / Sulfated Ash	TS 1985	% (m/m)	-	0.020	±0.000	0.007
11		Kükürt / Sulphur	TS EN ISO 20846	mg/kg	-	10.0	±0.3	6.2
12		Fosfor / Phosphorus (P)	TS EN 14107	mg/kg	-	4.0	±0.1	0.7
13		Metaller (Sodyum + Potasyum Toplamı) / Metals(Na, K)	TS EN 14538	mg/kg	-	5	±1	2
14		Metaller (Kalsiyum+Magnesyum Toplamı) / Metals(Ca,Mg)	TS EN 14538	mg/kg	-	5	±0	1
15		İyot Sayısı / Iodine Value , g Iyot / 100 g	TS EN 14111	gI2/100g	-	120	±3	109
16		Mono Gliserit Miktarı / Monoglicerit Content	TS EN 14105	% wt	-	0.70	±0.05	0.40
17		Di Gliserit Miktarı / Diglicerit Content	TS EN 14105	% wt	-	0.20	±0.06	0.15
18		Tri Gliserit Miktarı / Triglicerit	TS EN 14105	% wt	-	0.20	±0.01	0.04
19		Serbest Gliserol Miktarı / Free Glicerol	TS EN 14105	% wt	-	0.02	±0.00	0.00
20		Toplam Gliserol Miktarı / Total Glicerol	TS EN 14105	% wt	-	0.25	±0.03	0.13
21		Ester / Ester Contents	TS EN 14103	% (m/m)	96.5	-	±0.8	97.9
22		Linolenik Asit Metil Esteri / Linolenic Acid Methyl Ester	TS EN 14103	% (m/m)	-	12.0	±0.3	3.0
23		Çoklu Doymamış Metil Esterler / Polyunsaturated Methyl Esther	TS EN 14103	% (m/m)	-	1.0	±0.0	0.0
24		Asit Sayısı / Acid Number	TS EN 14104	mg KOH/g	-	0.50	±0.12	0.34
25		Bakır Şerit Korozyonu,50°C,3h / Copper Strip Corrosion 50°C,3h	TS 2741 EN ISO 2160	derece	1a		-	1a

* Akredite (AB-0173-T) ITS Caleb Brett/Deniz Survey A.Ş. İstanbul Laboratuvarında yapılmıştır. / Tested by (AB-0173-T) ITS Caleb Brett/Deniz Survey A.Ş. İstanbul laboratory .

Açıklamalar / Remarks Yaz: 1 Nisan - 31 Ekim (± 15 gün) /Kış:Yaz dönemi dışında kalan dönem / Soğuk Filtre Tıkanma Noktası (En Çok): +5(Yaz) / -5(Kış) / Monogliserit(En Çok): 0.70 (Yaz) / 0.40 (Kış) (Monogliserit Spekleri EN 590'a uygun dizel yakıt ile harmanlanmak için kullanılacak olan YAME için geçerlidir.) / NOT: Sodyum+Potasyum ve Kalsiyum+Magnesyum değerlerinin toplamına yukarıda belirtildiği gibi bakılır. Kayıt No : P2132/21

Deney laboratuvarı olarak faaliyet gösteren ITS Caleb Brett / Deniz Survey A.Ş. İskenderun Laboratuvarı, TÜRKAK'tan AB-0058-T dosya ile TS EN ISO IEC 17025:2017 standardına göre akredite edilmiştir. / As a testing laboratory, ITS Caleb Brett / Deniz Survey S.A. İskenderun Laboratuvarı is accredited in accordance to TS EN ISO IEC 17025:2017 standard under accreditation number AB-0058-T by Turkish Accreditation Agency (TURKAK).

Analiz Raporu tanzim yükümlülüğü olan DB TARIMSAL ENERJİ VE SAN.TİC.A.Ş.'den alınan Biyodizel numunesinin, yukarıda yer alan deney yöntemleri kullanılarak yapılan analiz sonucu, TS EN 14214:2012+A2:2019 std. yer alan özelliklere UYGUN olduğu tespit edilmiştir. / The analysis results of DB TARIMSAL ENERJİ VE SAN.TİC.A.Ş. sample which is owned by Biodiesel,that has arrangement responsibility, is determined to PASS comparing with properties stated in the standard TS EN 14214:2012+A2:2019

Açıklamalar: Bu rapor laboratuvarın izni olmaksızın kopyalanıp çoğaltılamaz. İmzasız ve mührünün raporlar geçersizdir. Sonuçlar analiz yapılan numuneye aittir. Deney sonuçlarının rapor tarihinden itibaren en geç 30(üç) ayiçinde itiraz edilebilir. Analiz raporunda yer alan numuneye ait bilgiler müşteri tarafından beyan edilmiştir. Bu bilgilerin doğruluğundan ve bu kaynağa bağlı olarak ortaya çıkabilecek tüm kayıplardan/yasal sorumluluklardan laboratuvarımız sorumlu değildir. /Description: This report cannot be copied and reproduced without the permission of the laboratory. Reports without signature or stamp are invalid. The results belong to the sample which is analyzed. Objection to the test results can be made in up to 3 (three) months. The information of the sample in this report are declared by the customer. Our laboratory is not responsible for correctness of these informations and all lessen legal obligations that may occur due to use.

Karar Kuralı: Laboratuvar tarafından uygunluk değerlendirilmesi, Basit Kabul Kuralına göre ölçüm belirsizliği ve güven düzeyi dikkate alınarak sonuçlar doğrudan raporlanarak uygunluk veya uygunluk kararı verilir. Ölçüm belirsizlikleri bu numune alınırken kayıtlarına katkı dahil edilmemiştir. Numune alınışı laboratuvar tarafından gerçekleştirilmediğinden gönderilen numunenin partiyi/bütünü temsil etme sorumluluğu laboratuvara ait değildir. Numune alındığı şekliyle deneye tabi tutulmuştur. /Decision Rule: The laboratory gives result directly and states 'Pass/Fail' conformity decision according to Simple Acceptance Rule which does not take account of measurement uncertainty and confidence interval. The addition from collection of sample is not added to account of measurement uncertainty. As collection of sample is not made by laboratory, laboratory is not responsible for the obligation of sample's representation to whole. The sample is subjected to analyse as it was collected.

Türk Akreditasyon Kurumu (TÜRKAK) deney raporlarının tanınırlığı konusunda Avrupa Akreditasyon Birliği(EA)'ile Çok Taraflı Anlaşma ve Uluslararası Laboratuvar Akreditasyon Birliği(ILAC)'ile karşılıklı tanıma anlaşması imzalamıştır. / Turkish Accreditation Agency (TURKAK) is a signatory to the European co-operation for Accreditation (EA) and International Laboratory Accreditation Cooperation (ILAC) for the recognition of test reports.