MARMARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ATIK ZEYTİNDEN ULTRASONİK YÖNTEM İLE ÜRETİLEN BİYODİZELİN BİR DİZEL MOTORDA PERFORMANS VE YANMA KARAKTERİSTİKLERİ ÜZERİNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ

HÜSEYİN SÖYLER

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 BIODIESEL PRODUCED FROM WASTE OLIVE BY ULTRASONIC METHOD ON PERFORMANCE AND COMBUSTION CHARACTERISTICS OF A DIESEL ENGINE

HÜSEYİN SÖYLER

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

“Atık Zeytinden Ultrasonik Yöntem ile Üretilen Biyodizelin Bir Dizel Motorda Performans ve Yanma Karakteristikleri Üzerine Etkisinin İncelenmesi” isimli bu doktora tez çalışması, Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği (Türkçe) Anabilim Dalı’nda hazırlanmıştır.

Doktora eğitimim boyunca her aşamada desteğini ve yardımlarını benden esirgemeyen, beni yönlendiren, teşvikleri, cesaretlendirmeleri, tavsiyeleri ve yorumları ile daima yanımda olan, bilgisini ve zamanını benimle paylaşan danışmanım Sayın Prof. Dr. Cenk SAYIN’a teşekkür eder, şükranlarımı sunarım.

Biyodizel üretiminde, motor deneylerinin yapılmasında ve tez çalışmasının tüm aşmalarında bilgisi, yorumları ve değerli tavsiyeleriyle her zaman yanımda olan Dr. Öğr. Üyesi. Mustafa Kemal BALKİ’ye en derin saygılarımla teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmasının gelişmesindeki değerli katkıları ile çalışmaya yön veren tez izleme komitesi üyeleri Prof. Dr. Mustafa ÇANAKCI’ya ve Doç. Dr. Mustafa YILMAZ’a, en derin saygılarımla teşekkür ederim.

Hayatım boyunca maddi ve manevi desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen aileme ve her zaman yanımda olan desteğini, sevgisini, sabrını, hoşgörüsünü ve inancını benden esirgemeyen değerli eşime sonsuz teşekkür ederim. Son olarak, çalışmalarım nedeniyle kendilerine yeteri kadar vakit ayıramadığım kızlarım Gül Bilge ve Güneş’e manevi desteklerinden ve sabırlarından dolayı sonsuz teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

SAYFA

ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR i
İÇİNDEKİLER vi
ÖZET vi
ABSTRACT viii
YENİLİK BEYANI x
SEMBOLLER xi
KISALTMALAR xiv
ŞEKİL LİSTESİ xvi
TABLO LİSTESİ 1
1.GİRİŞ 2
1.1. Genel Bilgiler 2
1.2. Bitkisel Yağların Yakıt Olarak Kullanımı İçin İyileştirme Yöntemlerinin Avantaj ve Dezavantajları 4
1.3. Literatür Araştırması 7
1.4. Çalışmanın Amacı 17
2. MATERYAL VE YÖNTEM 19
2.1. Atık Zeytinyağının Yağ Asidi Dağılımı 20
2.2. Ham Yağın Ön İyileştirmesi (Esterifikasyonu) 22
2.2.1. Taguchi yöntemi ile optimizasyon 22
2.2.2. Ön İyileştirme (esterifikasyon) Sonuçlarının Optimizasyonu 23
2.2.3. Sinyal/gürültü (S/N) oranları ve varyans analizi 24
2.3. Transesterifikasyon İşlemi 26
2.3.1. Klasik ısıtma ile transesterifikasyon işlemi 27
2.3.2. Ultrasonik banyo ile trasesterifikasyon işlemi 27

2.3.3. Ultrasonik homojenizatör ile transesterifikasyon işlemi 28
2.4. Deney Donanımı 31
2.4.1. Deney motoru 32
2.4.2. Egzoz gaz analizörü 34
2.5. Deney Yakıtları 34
2.6. Deney Yöntemi 36
2.6.1. Kullanılan çalışma parametreleri 36
2.6.2. Ayarlama karakteristikleri 36
2.6.2.1. Püskürtme avansı 36
2.6.2.2. Püskürtme basıncı 38
2.6.3. Yük karakteristikleri 39
2.7. Deney Verilerinin Analizinde Kullanılan Hesaplama Yöntemleri 39
2.7.1. Özgül yakıt tüketimi (ÖYT) 39
2.7.2. Efektif verim 40
2.7.3. Yanma Analizi 40
2.7.3.1. Silindir gaz basıncının analizi 40
2.7.3.2. Anlık silindir hacmi 41
2.7.3.3. Isı dağılım değişimleri 43
2.7.4. Egzoz emisyonları analizi 45
3. BULGULAR VE TARTIŞMA 46
3.1. Püskürtme Avansına Bağlı Değişimlerin Analizi 46
3.1.1. Motor performans sonuçlarının analizi 46
3.1.1.1. Özgül yakıt tüketiminin (ÖYT) püskürtme avansına bağlı olarak değişimi 47
3.1.1.2. Efektif verimin püskürtme avansına bağlı olarak değişimi 49
3.1.2. Yanma analizi 51

3.1.2.1. Silindir gaz basınçları ve ısı dağılımlarının püskürtme avansına bağlı değişimi 52
3.1.3. Egzoz emisyonu sonuçlarının analizi 60
3.1.3.1. Egzoz gaz sıcaklığının (EGS) püskürtme avansına bağlı olarak değişimi 60
3.1.3.2. Azot monoksit (NO) emisyonlarının püskürtme avansına göre değişimi 62
3.1.3.3. Karbondioksit (CO_2) emisyonlarının püskürtme avansına göre değişimi 64
3.1.3.4. Hidrokarbon (HC) emisyonlarının püskürtme avansına göre değişimi. 66
3.2. Püskürtme Basıncına Bağlı Değişimlerin Analizi 68
3.2.1. Motor performans sonuçlarının analizi 68
3.2.1.1. ÖYT'nin püskürtme basıncına bağlı olarak değişimi 68
3.2.1.2. Efektif verimin püskürtme basıncına bağlı olarak değişimi 71
3.2.2. Yanma analizi 73
3.2.2.1. Silindir gaz basınçları ve ısı dağılımlarının püskürtme basıncına bağlı değişimi 73
3.2.3. Egzoz emisyonlarının analizi 81
3.2.3.1. EGS'nin püskürtme basıncına bağlı olarak değişimi 81
3.2.3.2. NO emisyonlarının püskürtme basıncına göre değişimi 83
3.2.3.3. CO_2 emisyonlarının püskürtme basıncına göre değişimi 85
3.2.3.4. HC emisyonlarının püskürtme basıncına göre değişimi 87
3.4. Motor Deneylerinin Standart Sapma Sonuçları 89
4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER 90
KAYNAKLAR 96
EKLER 111
Ek 1- Tablo 1. Dizel yakıtı ile yapılan deneylerin standart sapma sonuçları 111

Ek 1- Tablo 2. B20 yakıtı ile yapılan deneylerin standart sapma sonuçları 112

Ek 1- Tablo 3. B40 yakıtı ile yapılan deneylerin standart sapma sonuçları 113

Ek 1- Tablo 4. B60 yakıtı ile yapılan deneylerin standart sapma sonuçları 114

Ek 1- Tablo 5. B80 yakıtı ile yapılan deneylerin standart sapma sonuçları 115

Ek 1- Tablo 6. B100 yakıtı ile yapılan deneylerin standart sapma sonuçları 116

ÖZET

ATIK ZEYTİNDEN ULTRASONİK YÖNTEM İLE ÜRETİLEN BİYODİZELİN BİR DİZEL MOTORDA PERFORMANS VE YANMA KARAKTERİSTİKLERİ ÜZERİNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ

Bu çalışmada, doğal yollarla toprağa düşmüş ve gıda niteliği taşımayarak atık zeytin adlandırılan ürün biyodizel üretimi için hammadde kaynağı olarak kullanılmıştır. Kullanılan yağın biyodizel üretimine uygun hale getirilmesi için ön iyileştirme yapılmıştır. Bu işlemde deney sayısını azaltmak ve optimum şartları belirlemek amacıyla Taguchi deney tasarımı kullanılmıştır. Bu hammaddeden elde edilmiş serbest yağ asidi yüksek olan atık zeytin yağından ultrasonik destekli biyodizel üretimi gerçekleştirilmiştir. Üretilen biyodizel altı farklı hacimsel oranda (%0, %20, %40, %60, %80 ve %100) harmanlanarak test yakıtları oluşturulmuştur. Motor deneyleri tek silindirli, 1,12 litre silindir hacmine sahip, common rail yüksek basınçlı enjeksiyon sistemli, ön püskürtmeli, motor yağlama ve soğutma sistemi şartlandırılmış dizel bir motorda yapılmıştır. Deneyler, motorun maksimum momentin elde edildiği 1500 d/d sabit motor hızında ve dört farklı motor yükünde (%25, %50, %75 ve %100) gerçekleştirilmiştir. Her bir yakıt, dört farklı püskürtme basıncı (-100, STD, +100 ve +200 bar) ve yine dört farklı püskürtme avansında (-2, STD, +2 ve +4 ^{o}KA) test edilmiştir. Deneyler sonucunda biyodizel ve karışım yakıtlarının dizele göre performans, yanma ve egzoz emisyon analizleri yapılarak değerlendirilmiştir. Deneylerde en yüksek motor gücü değerleri, dizel yakıtı ile yapılan deneylerde elde edilmiştir. Genel olarak dizel yakıtına hacimsel olarak %40'a kadar biyodizel ilavesi motor gücünde olumlu sonuçlar vermiş, ancak karışım içerisindeki biyodizel oranının %40'ı geçmesiyle motor gücünün azaldığı, özgül yakıt tüketiminin ise arttığı görülmüştür. Karışım içerisindeki biyodizel oranının artmasıyla maksimum silindir basıncı değerinin azaldığı görülmüştür. Benzer şekilde, azot monoksit ve karbondioksit emisyonları da aynı eğilimi göstermiş ve biyodizel oranının artmasıyla azalmıştır. Isı açığa çıkışlarında ise genel olarak dizele göre biyodizel içeren yakıtlardan daha erken olduğu görülmüştür. Püskürtme avansının azaltılması motor gücünde, azot monoksit ve karbondioksit emisyonunda düşüşe sebep olurken özgül yakıt tüketimi ve hidrokarbon

artışa sebep olmuştur. Püskürtme avansının motorun STD değerine göre artırılmasıyla motor gücü ve karbondioksit artarken, özgül yakıt tüketimi ve hidrokarbon azalmıştır. Püskürtme basıncının 100 bar azaltılması deney yakıtlarının tümünde motor gücünde düşüşe ve özgül yakıt tüketiminde ise artışa yol açmıştır. Ayrıca, basıncın düşürülmesi karbondioksit ve azot monoksit emisyonunu azaltırken hidrokarbon oluşumunu arttırmıştır. Püskürtme basıncının 100 ve 200 bar artırılması durumlarında ise motor gücünde nispeten artış gözlemlenmiştir. Püskürtme basıncının artmasıyla azot monoksit ve karbondioksit emisyonlarının yükseldiği ve hidrokarbon oluşumunun ise azaldığı tespit edilmiştir.

ABSTRACT

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF BIODIESEL PRODUCED FROM WASTE OLIVE BY ULTRASONIC METHOD ON PERFORMANCE AND COMBUSTION CHARACTERISTICS OF A DIESEL ENGINE

In this study, the product known as waste olive, which naturally falls to the ground and is not food grade, was used as a feedstock source for biodiesel production. To make the waste oil suitable for biodiesel production, esterification was carried out. The Taguchi L16 experimental design was used to reduce the number of experiments and determine the optimum conditions. Ultrasound-assisted biodiesel production was carried out from waste olive oil with a high content of free fatty acids from this feedstock. Test fuels were prepared by blending the produced biodiesel at six different volume ratios (0%, 20%, 40%, 60%, 80%, and 100%). The engine tests were conducted in a single cylinder with 1.12 liter cylinder, common rail high pressure injection system, pre-injection, conditioned engine lubrication and cooling system. The tests were conducted at a constant engine speed of 1500 rpm, at which the maximum torque of the engine was reached, and at four different engine loads (25%, 50%, 75%, and 100%). Each fuel was tested at four different injection pressures (-100, STD, +100 and +200 bar) and at four different injection feed rates (-2, STD, +2 and +4 CA). The tests evaluated the performance, combustion and exhaust emissions of biodiesel and fuel blends compared to diesel. During the trials, the highest engine performance was obtained with diesel fuel. In general, blending biodiesel with diesel fuel up to a volume fraction of 40% produced positive results in engine performance, but it was found that engine performance decreased, and specific fuel consumption increased when the biodiesel fraction in the blend exceeded 40%. It was observed that the maximum cylinder pressure value decreased with the increase of biodiesel content in the mixture. Nitrogen monoxide and carbon dioxide emissions also showed the same trend and decreased with increasing biodiesel content. On the other

hand, it was found that heat release generally occurred earlier with the biodiesel-containing fuels than with diesel. Decreasing the injection timing resulted in a decrease in engine power, nitrogen monoxide and carbon dioxide emissions, while BFSC and hydrocarbon increased. Increasing the injection timing to match the STD value of the engine increased engine power and carbon dioxide, while BFSC and hydrocarbon decreased. Decreasing the injection pressure by 100 bar resulted in a decrease in engine power and an increase in BFSC for all test fuels. In addition, lowering the pressure increased hydrocarbon formation, while carbon dioxide and nitrogen monoxide emissions decreased. In the cases where the injection pressure was increased by 100 and 200 bar, a relative increase in engine performance was observed. It was determined that the nitrogen oxide and carbon dioxide emissions increased, and the hydrocarbon formation decreased with the increase of the injection pressure.

YENİLİK BEYANI

ATIK ZEYTİNDEN ULTRASONİK YÖNTEM İLE ÜRETİLEN BİYODİZELİN BİR DİZEL MOTORDA PERFORMANS VE YANMA KARAKTERİSTİKLERİ ÜZERİNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ

Tüm dünyada elektrikli otomobil çalışmaları hızla devam etmektedir. Ülkemiz de yerli ve milli elektrikli otomobil konusunda çok büyük yatırımlar yaparak üretime başlamıştır. Ancak, tüm dünyadaki elektrikli araç çalışmaları çoğunlukla binek otomobiller içindir. Ağır vasıta, otobüs, jeneratör ve iş makineleri gibi yüksek güç gerektiren dizel araçların uzun yıllar daha kullanılacağı öngörülmektedir. Bu yüzden, mevcut dizel motorlarda alternatif yakıtların kullanımının araştırılması, mevcut motor performanslarının iyileştirilmesi ve emisyonlarının azaltılması ile ilgili araştırmaların yapılması kaçınılmaz hale gelmiştir. Yenilebilir veya yenilemeyen yağlı tohumlardan biyodizel üretilebilmektedir. Ancak, bu durum dünyada gıda krizine yol açabilir. Bu sebeple biyodizel üretiminde üçüncü jenerasyon yakıtlar olarak adlandırılan ve atık hammaddelerden üretilen yakıtlar büyük önem arz etmektedir. Bu çalışmanın özgünlüğü doğal yollarla ağacın dibine düşen, yapısı ve dokusu bozulan bu nedenle gıda niteliğini kaybeden atık zeytinden biyodizel üretilmesidir. Çalışmanın diğer bir farklılığı ise kullanılan deney motorunun yüksek hacimli ve common rail enjeksiyon sistemli olmasının yanı sıra, motor soğutma sıvısı ve motor yağlama yağının deneyler sırasında sabit sıcaklıkta tutulabilmesidir. Ayrıca, deney motorunun; kalibrasyonu yapılmış, bütün motor devirleri için püskürtme basınç ve avans haritaları çıkartılmış, son teknolojiye sahip olması da bir başka yeniliktir. Bunların yanı sıra, deney test sistemi tamamen bilgisayar kontrollü olduğundan insandan kaynaklı deneysel hatalar minimuma indirgenmiştir. Literatürdeki eksiklikler gözlemlenerek oluşturulan bu çalışmada; altı farklı yakıt (B0, B20, B40, B60, B80 ve B100) dört farklı motor yükünde (%25, %50, %75, ve %100), dört farklı püskürtme avansında (-2°, STD, +2° ve +4 ^{o}KA) ve dört farklı püskürtme basıncında (-100, STD, +100 ve +200 bar) test edilmiş ve toplam 168 adet motor deneyi gerçekleştirilerek kapsamlı bir çalışma yapılmıştır.

SEMBOLLER

C : Karbon

C_d : Deşarj katsayısı

C_v : Sabit hacimde özgül ısınma ısısı (kJ/kgK)

CO : Karbonmonoksit

CO_2 : Karbondioksit

d : Orifis plaka çapı (m)

F : Dinamometre gövdesi yük değeri (kg)

g : Yerçekimi ivmesi (m/s^2)

h : Özgül nem (g H_2O/kg-kuru hava)

HC : Hidrokarbon

H_{CO} : Karbonmonoksit oluşum entalpisi

H_{NO} : Azot monoksitin oluşum entalpisi

H_u : Yakıtın alt ısıl değeri (kJ/kg)

H_2 : Hidrojen

H_2SO_4 : Sülfürik asit

k : Özgül ısı oranı

KOH : Potasyum hidroksit

L_{kol} : Moment kol uzunluğu (m)

M_e : Efektif motor momenti (Nm)

$M_{yağ}$: Yağın moleküler ağırlığı (g/mol)

$m_{yakıt}$: Yakıt kütlesi (kg)

$\dot{m}_y$: Kütlesel yakıt debisi (kg/m^3)

n : Motor hızı (d/d)

$NaOCH_3$: Sodyum Metoksit

N_e : Efektif güç (kW)

n_{max} : Maksimum motor hızı (d/d)

NO_2 : Azot dioksit

NO_x : Azot oksit

P : Basınç (bar)

P_{atm} : Atmosfer basıncı (bar)

P_{mut} : Mutlak basınç (bar)

$P_{gös}$: Gösterge basıncı (bar)

R : İdeal gaz sabiti (kJ/kgK)

SO_2 : Kükürt dioksit

T : Sıcaklık (K)

V_c : Yanma odası hacmi (m^3)

V_h : Silindir kurs hacmi (m^3)

V_θ : Anlık silindir hacmi (m^3)

Q_{max} : Maksimum hacimsel hava tüketimi (m^3/s)

ω : Açısal hız (rad/s)

X_{nem} : Nem faktörü

ρ_{hava} : Havanın yoğunluğu (kg/m^3)

$\rho_{sıvı}$: Eğik manometre sıvı yoğunluğu (kg/m^3)

λ : Hava fazlalık katsayısı

$\boldsymbol{\Delta_l}$ **:** Eğik manometre sıvı yükselme miktarı (mmH_2O)

$\boldsymbol{\Delta_t}$ **:** Yakıt tüketilme süresi

$\boldsymbol{\eta_v}$ **:** Volumetrik verim

$\boldsymbol{\Phi}$ **:** Eşdeğerlik oranı

KISALTMALAR

AÇI **:** Açığa Çıkan Isı Miktarı (J/KA)

CI **:** Compression Ignition

CNG : Compressed Natural Gas

CRDI **:** Common Rail Diesel Injection

EGR **:** Exhaust Gas Recirculation

EGS **:** Egzoz Gaz Sıcaklığı

EKAO **:** Egzoz kütle akış oranı

EKÜ **:** Elektronik Kontrol Ünitesi

H/Y **:** Hava/Yakıt Oranı

HFK **:** Hava Fazlalık Katsayısı

HRR **:** Heat Release Rate

İYM **:** İçten Yanmalı Motorlar

KA **:** Krank Açısı (°)

MTD **:** Mikrodalga Destekli Transesterifikasyon

OEB **:** Ortalama Efektif Basınç (kPa)

ÖET **:** Özgül Enerji Tüketimi ($kJ/kWh \cdot 10^3$)

ÖYT **:** Özgül Yakıt Tüketimi (g/kWh)

PA **:** Püskürtme Avansı

PB **:** Püskürtme Basıncı

PAH **:** Polisiklik Aromatik Hidrokarbonlar

PM **:** Partikül Madde

$R_{1,2,3}$ **:** Yağ asitlerine Ait Karbon Zinciri

RUTE **:** Raylı Ulaşım Teknolojileri Enstitüsü

SCR **:** Selective Catalytic Reduction

SGB **:** Silindir Gaz Basıncı (kPa)

STD **:** Standart Püskürtme Basıncı ve Avansı

SYA **:** Serbest Yağ Asidi

TG **:** Tutuşma Gecikmesi

ÜÖN **:** Üst Ölü Nokta

YV **:** Yanma Verimi (%)

ŞEKİL LİSTESİ

SAYFA

Şekil 1. 1. Biyodizel yağların yakıt olarak kullanılması için iyileştirme metotlarının avantaj ve dezavantajları 4
Şekil 1. 2. Transesterifikasyon reaksiyonu 5
Şekil 1. 3. Transesterifikasyon işlemi akış şeması 6
Şekil 2. 1. Çalışma yönteminin şematik olarak gösterimi 19
Şekil 2. 2. Serbest yağ asit tayini 20
Şekil 2. 3. Deneysel değişkenlerin SYA'ya etkisi 26
Şekil 2. 4. Deneysel değişkenlerin S/N oranları 26
Şekil 2. 5. Ultrasonik banyo 28
Şekil 2.6. Ultrasonik homojenizatör 29
Şekil 2. 7. Ayırma hunisinde gliserin ve metil ester karışımı 30
Şekil 2. 8. Vakum pompası ile filtreleme 31
Şekil 2. 9. Deney donanımının şematik görünümü 32
Şekil 2. 10. Deney motoru ve dinamometre 33
Şekil 2. 11. Deneylerde kullanılan hammadde ve yakıtlar 34
Şekil 3. 1. ÖYT'nin püskürtme avansına göre değişimi 47
Şekil 3. 2. Efektif verimin püskürtme avansına göre değişimi 50
Şekil 3. 3. Silindir gaz basınçları ve ısı dağılımlarının STD PA'daki değişimleri 53
Şekil 3. 4. Silindir gaz basınçları ve ısı dağılımlarının -2 ^{o}KA'daki değişimleri 55
Şekil 3. 5. Silindir gaz basınçları ve ısı dağılımlarının +2 ^{o}KA'daki değişimleri 57
Şekil 3. 6. Silindir gaz basınçları ve ısı dağılımlarının +4 ^{o}KA'daki değişimleri 58
Şekil 3. 7. Silindir gaz basıncı konumunun püskürtme avansına göre değişimi 60
Şekil 3. 8. EGS'nin püskürtme avansına bağlı olarak değişimi 61
Şekil 3. 9. NO emisyonlarının püskürtme avansına göre değişimi 63
Şekil 3. 10. CO_2 emisyonlarının püskürtme avansına göre değişimi 65
Şekil 3. 11. HC emisyonlarının püskürtme avansına göre değişimi 67
Şekil 3. 12. ÖYT'nin püskürtme basıncına göre değişimi 69
Şekil 3. 13. Efektif verimin püskürtme basıncına bağlı olarak değişimi 72
Şekil 3. 14. Silindir gaz basınçları ve ısı dağılımlarının STD PB'daki değişimleri 74

Şekil 3. 15. Silindir gaz basınçları ve ısı dağılımlarının -100 bar'daki değişimleri..... 76
Şekil 3. 16. Silindir gaz basınçları ve ısı dağılımlarının +100 bar'daki değişimleri..... 78
Şekil 3. 17. Silindir gaz basınçları ve ısı dağılımlarının +200 bar'daki değişimleri..... 79
Şekil 3. 18. Silindir gaz basıncı konumunun püskürtme basıncına göre değişimi..... 81
Şekil 3. 19. EGS'nin püskürtme basıncına bağlı olarak değişimi..... 82
Şekil 3. 20. NO emisyonlarının püskürtme basıncına göre değişimi 84
Şekil 3. 21. CO_2 emisyonlarının püskürtme basıncına göre değişimi 86
Şekil 3. 22. HC emisyonlarının püskürtme basıncına göre değişimi 87

TABLO LİSTESİ

SAYFA

Tablo 1. 1. Biyodizel üretiminde kullanılan farklı metotların avantaj ve dezavantajları 7
Tablo 1. 2. Serbest Yağ Asidi Yüksek Yağ ile Biyodizel Üretimi Yapılan Benzer Çalışmalar 9
Tablo 2. 1. Doymuş ve doymamış yağ asit oranları 21
Tablo 2. 2. Deney değişkenleri ve seviyeleri 23
Tablo 2. 3. Taquchi deney tasarımı ve deneysel sonuçları 24
Tablo 2. 4. Proses optimizasyon hedefine göre S/N hesaplamaları 25
Tablo 2. 5. Deney dolanımında bulunan cihazlar ve hassasiyetleri 32
Tablo 2. 6. Deney motoruna ait özellikler 33
Tablo 2. 7. Emisyon cihazına ait teknik özellikler 34
Tablo 2. 8. Deney yakıtının bazı fiziksel ve kimyasal özellikleri 35
Tablo 2. 9. Deney motorunun farklı yüklerdeki püskürtme avansı değerleri 37
Tablo 2. 10. Motor gücünün püskürtme avansına göre farklı yüklerdeki değişimi 37
Tablo 2. 11. Deney motorunun farklı yüklerdeki püskürtme basıncı değerleri 38
Tablo 2. 12. Motor gücünün püskürtme basıncına göre farklı yüklerdeki değişimi 38

1.GİRİŞ

1.1. Genel Bilgiler

Artan dünya nüfusuyla birlikte gelişen sanayileşme ve kullanılan taşıt sayısındaki yükseliş, beraberinde enerjiye olan ihtiyacın fazlalaşmasına neden olmaktadır. Günümüzde, enerji ihtiyacı çoğunlukla fosil kökenli yakıtlardan karşılanmaktadır. Bu yakıtların üretimi ve kullanımı sırasında oluşan kirletici gazlar çevresel açıdan önemli bir sorun oluşturmaktadır. Bu sorunlardan bazıları; kükürt dioksit (SO_x), karbondioksit (CO_2) ve azot oksit (NO) gibi emisyonların neden olduğu sera gazı etkisi ve asit yağmurlarıdır. İnsan sağlığını da tehdit eden bu unsurları en aza indirebilmek için ülkeler tarafından yasal zorunluluklar getirilmekte ve kirletici egzoz emisyonlarına sınırlamalar konulmaktadır. Ayrıca, fosil yakıtların sınırlı olması ve yakın gelecekte daha da azalacak öngörüsü tüm ülkelerin ortak sorunudur. Bu sorunların çözümü için araştırmacılar, daha çevreci ve kullanılabilir olan alternatif enerji kaynakları üzerine çalışmalarını yoğunlaştırmaktadırlar. Ayrıca, mevcut enerjiden maksimum fayda sağlayacak, çevreci ve alternatif yakıtlara uyumlu yeni motor teknolojileri geliştirme çalışmaları da yürütülmektedir.

Sıkıştırma ateşlemeli motorlar (CI), sahip oldukları teknik özelliklerinden dolayı günümüzde başta ağır vasıtalar olmak üzere binek araçlar, jeneratör ve su pompaları gibi bazı alanlarda da sıklıkla kullanılmaktadır. Bu motorlarda kullanılan petrol kökenli dizel yakıtı, yüksek miktarda aromatik bileşik ve sülfür içermektedir. Yakıt bileşimindeki bu unsurlar yanma sırasında çevre kirliliği oluşturabilecek zararlı egzoz gazlarının oluşumuna neden olmaktadır. Bu bağlamda, Avrupa Birliği (AB) Komisyonu bu konuda bazı sınırlamalar getirmiştir. Getirilen bu kısıtlamalar, araştırmacıları daha yüksek performans sağlayan ama daha az kirletici gaz üreten motorlar geliştirmeye teşvik etmiştir. Motorlardan kaynaklanan emisyonların, çevre ve ekosistem üzerinde oluşturduğu olumsuz etkileri en aza indirmek için motorların yeniden tasarımı da dahil olmak üzere birçok düzenleme yapılmaktadır. Bu kapsamda taşıt üreticileri; yakıt püskürtme sistemlerinde basıncı arttırmak, püskürtme işlemini tek seferde değil de kademeli olarak yapmak, egzoz gazı geri dönüşümü ile silindir içi sıcaklıkları sınırlamak, partikül filtreleri ve üç yollu katalitik konvertör ile kirletici gazları motordan atmosfere salınmadan önce temizlemek gibi yeni sistemler geliştirmişlerdir. Günümüzde bu ve

benzeri yöntemler ile, dizel yakıtlı taşıtların oluşturduğu egzoz emisyonlarını kabul edilebilir sınırlar içinde tutulmaya çalışılmaktadır [1]. Geliştirilen bu sistemlerin yanı sıra bir başka önemli konu ise, sıkıştırma ile ateşlemeli motorlarda herhangi bir yapısal değişiklik yapmadan alternatif yakıtların bu motorlarda kullanılabilmesidir. Alternatif yakıtların çevreci, ekonomik, yerli ve uygulanabilir olmasının yanında sürdürülebilir olması da gerekmektedir. Bu yüzden araştırmacılar tarafından özellikle bitkisel ve hayvansal yağlar gibi kaynaklardan elde edilen yağlardan üretilen biyodizel yakıtı, dizelin alternatifi olarak araştırılmaktadır [2].

Literatürde yapılan bazı çalışmalarda bitkisel ve hayvansal yağlardan üretilen biyodizelin kullanılması ile petrol dizeline olan bağımlılığının azaltılabileceği belirtilmiş ve biyodizel kullanımı ile egzoz emisyonlarından kaynaklanan kirliliğin azaltılabileceği vurgulanmıştır [3]. Biyodizelin dizel motorlarda kullanımı ile ilgili yapılan çalışmalarda karbon monoksit (CO), karbondioksit (CO_2), kükürt oksitler (SO_x), partikül madde (PM), polisiklik aromatik hidrokarbonlar (PAH) ve nitrik polisiklik aromatik hidrokarbon (nPAH) emisyonlarında dizel yakıtına göre azalma olduğu, ancak silindir içi sıcaklıkların yükselmesiyle beraber azot oksit (NO) emisyonlarının kısmen daha yüksek olduğu ifade edilmiştir [4,5]. Biyodizelin CI motorlarda saf olarak ya da dizel yakıtı ile farklı oranlarda karıştırılarak kullanılmasının, dizel yakıtına kıyasla daha düşük emisyon değerlerine sahip olması ve yağlayıcılık özelliğinin iyi olması gibi avantajları vardır. Bunların yanı sıra kükürt oranının neredeyse sıfır olması, yenilenebilir olması ve daha yüksek parlama noktasına sahip olması, biyodizelin önemli avantajlarıdır [6–8]. Ayrıca, biyodizelin kısmen yüksek NO emisyonlarına sahip olması, ısıl değerinin düşük olması ve soğuk akış özellikleri hala geliştirilmesi gereken özellikleridir [9,10].

Türkiye zeytin ve zeytinyağı üretiminde önemli bir paya sahiptir. Ülkenin birçok bölgesinde zeytin yetiştiriciliği yapılmaktadır. Zeytin yetiştiriciliği her geçen gün artmaktadır. Örneğin, 1988 yılında Türkiye'de 85.646.000 adet zeytin ağacı varken, 2022 yılında bu sayı 194.519.000'e ulaşmıştır [11]. Bu çalışmada doğal yollarla toprağa düşmüş ve gıda niteliğini kaybetmiş zeytinden elde edilmiş yağ kullanılmıştır. Yaklaşık olarak her ağaçtaki zeytin miktarının %10'nun doğal yollarla toprağa düştüğü varsayılmaktadır. Bu oran zeytin hasadının gecikmesiyle birlikte artış göstermektedir. Atık zeytinler genellikle sabun yapımında veya kozmetik sektöründe kullanılmaktadır.

Bu zeytinlerden elde edilen yağın biyodizel üretiminde kullanılması ekonomik açıdan oldukça önemlidir.

1.2. Bitkisel Yağların Yakıt Olarak Kullanımı İçin İyileştirme Yöntemlerinin Avantaj ve Dezavantajları

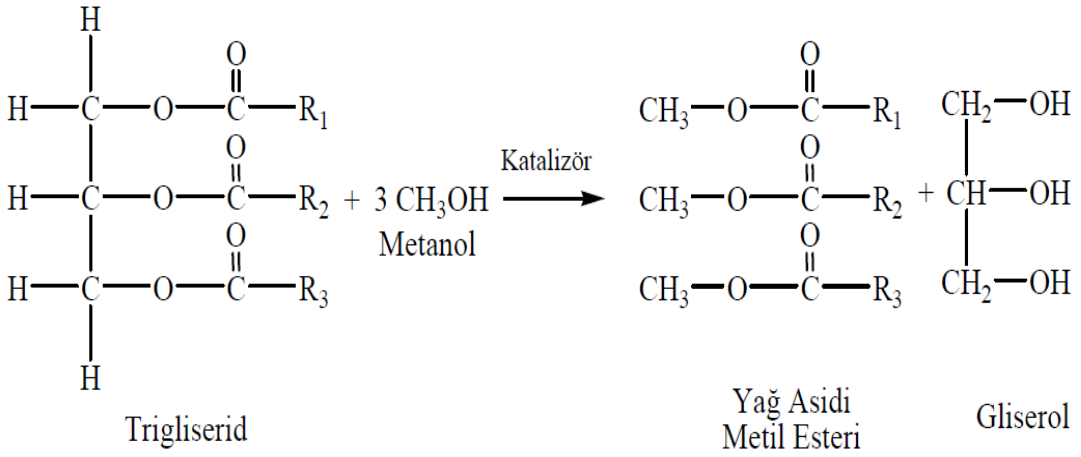
Biyodizel bitkisel ya da hayvansal yağların katalizörle birlikte alkol ile reaksiyona sokulması sonucu elde edilir. Yağlı tohumlardan elde edilen yağların yanı sıra kızartma ve atık bitkisel yağlar da biyodizel üretiminde kullanılmaktadır. Biyodizeller fiziksel ve kimyasal özelliklerine bağlı olarak uygun motorlarda karışım halinde ya da saf olarak kullanılabilir. Biyodizel yağların yakıt olarak kullanılması için iyileştirme metotlarının avantaj ve dezavantajları Şekil 1.1'de verilmiştir.



Şekil 1. 1. Biyodizel yağların yakıt olarak kullanılması için iyileştirme metotlarının avantaj ve dezavantajları

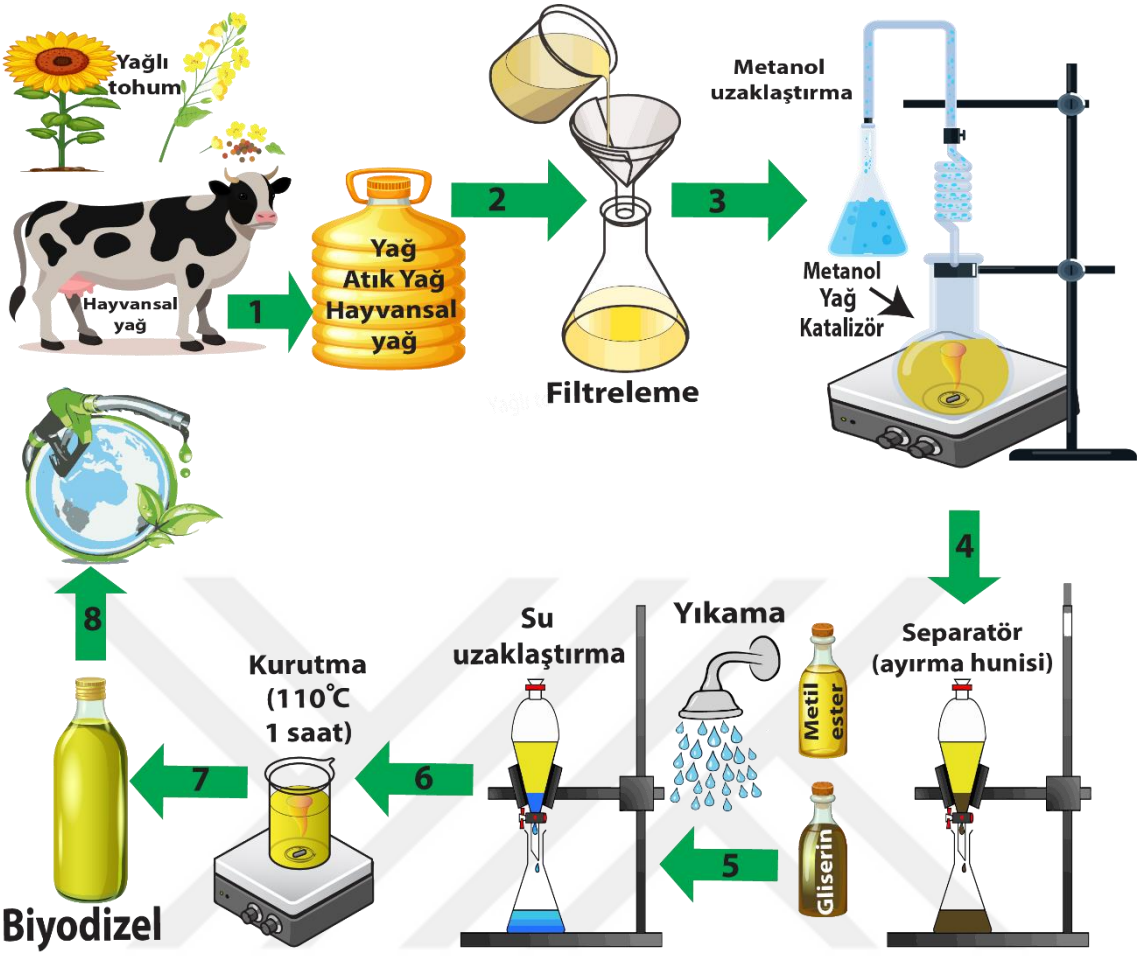
Araştırmacıların genel olarak tercih ettikleri yöntem transesterifikasyondur. Bu yöntemde; biyodizel üretiminde kullanılacak yağa belirli oranlarda uygun bir katalizör ve alkol eklenerek 60-65 ^{o}C 'sıcaklıklarda yaklaşık 60 dakika karıştırma işlemi yapılır. Bu sürenin sonunda biyodizel ve gliserin karışımı elde edilir. Gliserinin yoğunluğundan dolayı dibe çökmesi için 24 saat beklenir ve ayrıştırma yapılır. Bu işlemlerin sonunda ana

ürün olarak biyodizel, yan ürün olarak ise gliserin elde edilir. Elde edilen biyodizelin EN 14214 standartlarına uygun olması gerekmektedir. Transesterifikasyon reaksiyonuna ait kimyasal işlem Şekil 1.2'de verilmiştir.



Şekil 1. 2. Transesterifikasyon reaksiyonu [12]

Şekil 1.2'de gösterilen R1, R2, R3 yağ asitlerine ait karbon zincirini ifade eder. Transesterifikasyon ile biyodizel üretimi Şekil 1.3'te ayrıntılı olarak verilmiştir.



Şekil 1. 3. Transesterifikasyon işlemi akış şeması

Burada;

1: Hayvansal yağlardan ve yağlı tohumlardan yağ elde edilmesi

2: Biyodizel üretiminde kullanılacak yağın yabancı maddelerden temizlenmesi için filtreleme yapılması

3: Elde edilen yağa metanol ve katalizör eklenerek 65 ^{o}C'de karıştırılması

4: Metil ester karışımının separatöre alınarak 24 saat boyunca bekletilerek gliserin ve metil esterin ayrıştırılması

5: Yıkama yapılması ve suyun uzaklaştırılması

6: 110 ^{o}C'de 1 saat boyunca kurutma yapılması

7: Biyodizel elde edilmesi

8: Elde edilen bioyakıtın kullanımıyla çevresel yaşam döngüsüne katkı sağlanması

Transesterifikasyon ile biyodizel eldesinde yağın ısıtılması ve karıştırılması farklı yöntemlerle yapılmaktadır. Bunlardan bazıları; klasik ısıtıcı ile üretim, mikrodalga destekli üretim ve ultrasonik destekli üretimdir. Biyodizel üretiminde kullanılan farklı yöntemlerin avantaj ve dezavantajları Tablo 1.1'de verilmiştir.

Tablo 1. 1. Biyodizel üretiminde kullanılan farklı metotların avantaj ve dezavantajları

Biyodizel üretim yöntemi	Avantajları	Dezavantajları	Referans
UIltrasonik destekli üretim	• Yüksek dönüşüm verimi • Düşük reaksiyon süresi • Düşük enerji tüketimi • Daha az katalizör ihtiyacı • Daha yüksek reaksiyon hızı	• Endüstriyel tasarımı karmaşık ve maliyetlidir • Yüksek ses seviyesi • Pahalıdır	[13–24]
Mikrodalga destekli üretim	• Çevreseldir • Ekstraksiyon süresi kısadır • Düşük reaksiyon süresi • Reaksiyon hızı yüksektir	• Büyük ölçekli üretime uygun değildir • Pahalıdır	[25–32]
Konvansiyonel ısıtıcılı ve karıştırıcılı üretim	• Ucuzdur • Büyük ölçeklerde üretimi daha kolay ve ucuzdur	• Daha uzun reaksiyon süresi • Yüksek enerji tüketimi	[24,31,33–35]

1.3. Literatür Araştırması

Alternatif yakıtlar ile yapılan çalışmalar gelecek için büyük önem taşımaktadır. Bu yakıtlar ile ilgili araştırmalar literatürde ayrıntılı olarak belirtilmiş olup, elde edilen bazı sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenmiştir. Literatür özeti genel olarak 4 kısımdan oluşmaktadır:

- İlk olarak, ön iyileştirme (esterifikasyon) ile ilgili çalışmalar özetlenmiştir.
- İkinci olarak, farklı yöntemlerle yapılan transesterifikasyon ile biyodizel üretimi konusundaki çalışmalar irdelenmiştir.

- Üçüncü kısımda, gıda niteliği taşımayan zeytinyağından biyodizel üretimi ile ilgili yapılmış çalışmalar özetlenmiştir
- Dördüncü kısımda ise dizel motorlarda püskürtme avansı ve basıncının değişimin etkileri üzerine durulmuştur.

Literatürdeki ön iyileştirme ile alakalı yapılan çalışmalar incelendiğinde, çok sayıda çalışmanın olduğu görülmüştür. Bunlar arasından bu çalışmada yağın serbest yağ asidine (SYA) yakın değerdeki bazı çalışmalar detaylı olarak özetlenmiş, diğerleri ise tablo olarak sunulmuştur.

Alptekin çalışmasında, serbest yağ asidi 52,30 mg $KOH.g^{-1}$ olan atık tavuk ve 24,70 mg $KOH.g^{-1}$ olan deri yağlarının asit değerlerinin biyodizel üretimine uygun olmamasından dolayı ön iyileştirme işlemine tabi tutmuştur. Bu işlemi, alkol olarak metanol ve katalizör olarak sülfürik asit kullanarak 60 dakikada gerçekleştirmiştir. Atık deri yağı ile yaptığı ön iyileştirmede 30:1 metanol-SYA molar oranı ve yağın SYA değerine göre %10 sülfürik asit ve değerlerini seçmiştir. Atık tavuk yağının SYA'sının çok yüksek olmasından dolayı 2 adımlı bir işlem gerçekleştirmiş ve her iki yağın SYA'sını %1'in altına düşürmüştür [36].

Benzer bir çalışmada, SYA değeri 14 mg $KOH.g^{-1}$ olan domuz yağı atıklarına 2 adımlı estrifikasyon işlemi uygulanmış ve katalizör olarak sülfürik asit (H_2SO_4) tercih edilmiştir. Çalışmanın 1. adımda %2 H_2SO_4, 6:1 alkol/yağ molar oranı kullanılmış fakat biyodizel üretimi için gerekli asit değerine ulaşılamadığı için 2. adımda %3 asit katalizör kullanılmıştır. Sonuç olarak 3 saatlik sürenin sonunda asit değeri, 3 mg $KOH.g^{-1}$'a düşürülmüştür [37].

Rahmadhas vd. SYA'sı %34 olan kauçuk yağı ile yaptıkları çalışmada biyodizel üretimine geçmeden önce SYA'yı uygun değere getirmek için yağı esterifikasyon işlemine tabi tutmuşlardır. Alkol/yağ molar oranını 15:1-35:1 arasında ve asit katalizör (sülfürik asit) oranını ise %0,25-2 arasında seçmişlerdir. Yapılan işlemler sonucunda kauçuk yağının SYA değerini %2'den aşağıya düştüğü görülmüştür [38].

Serbest yağ asidi yüksek yağların asit değerlerinin biyodizel üretimine uygun hale getirilmesi ile ilgili benzer çalışmalar Tablo 1.2'de özetlenmiştir:

Tablo 1. 2. Serbest Yağ Asidi Yüksek Yağ ile Biyodizel Üretimi Yapılan Benzer Çalışmalar

Ham madde	Serbest Yağ Asidi (%)	Katalizör tipi	Katalizör Miktarı (Ağırlıkça %)	Metanol-Yağ Molar Oranı	Esterifikasyon Sonrası SYA (%)	Ref.
Neem yağı	20,3	Sülfürik asit	4,5	6:1	3,6	[39]
Silybum marianumL. Tohum yağı	10	Sülfürik asit	6	15:1	0,68	[40]
Atık kızartma yağı	7,5	Gliserin			<1	[41]
Atık kızartma yağı	11,97	Gliserin			<1	[41]
Hayvansal yağ, atık yağ, katı yağ	>36	Sülfürik asit	4,23	11,8:1	0,28	[42]
Hayvansal yağ, atık yağ, katı yağ	>27	Sülfürik asit	3,35	15,3:1	0,61	[42]
Hayvansal yağ, atık yağ, katı yağ	>92	Sülfürik asit	3,68	9,9:1	0,69	[42]
Hayvansal atık yağ	9,3	Sülfürik asit	2	6:1	1,86	[43]
Çamur palmiye yağı	24,4	Sülfürik asit	10,54	17:1	<1	[44]
Katı yağ	5	Sülfürik asit	10	40:1	<1	[45]
Katı yağ	>50	Alüminyum klorür hekzahidrat	2	10:1	<5	[46]
Atık kızartma yağı	84,5	Sülfürik asit	10	30:1	<5,5	[47]
Atık kızartma yağı	18,35	Sülfürik asit	3,5	52:1	<1	
		Heterojen olarak katalize edilmiş çimento fırını tozu	2	18:1	<1	[48]
Çamur palmiye yağı	52,17	Lipaz karışımı çözeltisi	5	3:1	<2	[49]
Atık kızartma yağı	17,2	Alüminyum oksit	5	10:1	<1	[50]
Atık zeytin yağı	23,34	Sülfürik asit	20	22:1	0,564	[51]

Kadapure vd. Pongamia pinnata yağı ile yaptıkları çalışmada yağın SYA'sının 16 mg $KOH.g^{-1}$ olduğunu ve bu değerin biyodizel üretimi için uygun olmadığını belirtmişlerdir. Bu yüzden ilk önce yağın SYA'sını düşürmek için ön işlem uygulanmıştır. Katalizör olarak tetraoksosülfat, alkol olarak metanol tercih edilmiş ve reaksiyonu 60 ^oC sıcaklıkta ve 15, 30, 45 ve 90 dakika arasındaki farklı sürelerde gerçekleştirmiştir. Yapılan testler sonucunda yağın SYA değeri sırasıyla 8,8, 4,6, 1,4 ve 0,4 16 mg $KOH.g^{-1}$ olarak bulunmuştur [52].

Günümüzde uygulanan biyodizel üretim yöntemleri incelendiğinde, konvansiyonel ısıtma, mikrodalga destekli ve ultrasonik destekli üretimle ilgili çalışmalar öne çıkmaktadır.

Motosami ve Ani, farklı biyodizel hammaddeleriyle yaptıkları çalışmada, mikrodalga destekli biyodizel üretimi ile ilgili kapsamlı bir inceleme yapmıştır. Araştırma sonucunda, mikrodalga destekli üretimin klasik yöntemlere kıyasla reaksiyon süresini azalttığını ve farklı bitkilerden yüksek kalitede biyodizel elde edilebileceğini belirtmiştir. İncelemelerin sonunda, mikrodalga destekli biyodizel üretim yönteminde harcanan enerjiyi hesaplamış ve sistemin sürdürülebilir olduğunu ifade etmiştir. Bundan dolayı bu metodun biyodizel üretiminde maliyeti azaltmak için uygun bir yöntem olabileceğini ortaya koymuştur [53].

Yapılan benzer bir çalışmada, araştırmacılar palm yağından sürekli biyodizel üretimi için ticari mikrodalga reaktör kullanarak sadece 1,75 dakikada %99,4 gibi yüksek ester içeriğini elde etmiştir. Ayrıca, mikrodalga yöntemi kullanarak biyodizel üretmenin avantajlarını belirlemek amacıyla sürecin enerji tüketimini hesaplamıştır. Bu yöntemin konvansiyonel sistem ile karşılaştırıldığında daha az enerjiye ihtiyacı olduğunu ortaya koymuştur [54].

Tangy vd. katalizör olarak Stronsiyum oksit (SrO) kullanılan diğer bir çalışmada mikrodalga yöntemiyle üretilen biyodizelde %99,2'lik bir dönüşüm verimi elde etmiştir [55].

Azcan ve Yılmaz tarafından yapılan çalışmada, atık kızartma yağından mikrodalga yöntemiyle biyodizel elde edilmiştir. Üretimde, katalizör olarak sodyum methoxide ($NaOCH_3$) ve metil alkol kullanılmıştır. Farklı reaksiyon süreleri, metanol ve katalizör oranlarında yapılan deneyler ile en verimli dönüşüm yöntemi araştırılmıştır. Sonuçlara

göre, en yüksek biyodizel dönüşümünün %98,87 oranı ile %1 katalizör, 6:1 metanol/yağ molar oranı ve 60 ^{o}C reaksiyon sıcaklığı ile gerçekleştiğini ve üretim süresinin de 5 dakika olduğu ifade edilmiştir [56].

Lin ve Chen çalışmalarında, jatropha yağından biyodizel üretmek için geliştirilmiş olan mikrodalga ünitesinde yağ asit oranı yüksek çıkan jatropha yağının önce etil ester ile yağ asit oranını düşürmüş, daha sonra dönüşüm işlemini başlatmışlardır. Çalışma şartları, 6:1 metanol/yağ molar oranı, %1 katalizör oranı, 200 d/d karıştırma hızı ve 65 ^{o}C reaksiyon sıcaklığı olarak belirlenmiştir. Bu şartlarda yağ dönüşüm oranı %90 çıkmış ve işlem 10 saniyede gerçekleşmiştir. Sonuç olarak mikrodalga reaktör ile reaksiyon süresinin geleneksel ısıtma metoduna göre oldukça azaldığı görülmüştür. Ayrıca, araştırmacılar sürekli mikrodalga reaktörler kullanılarak seri üretimin gerçekleştirilebileceğini vurgulamıştır [57].

Sherbiny vd. yapmış oldukları çalışmada, biyodizeli öncelikle geleneksel yöntemle üretmiş, daha sonra mikrodalga tekniği kullanmıştır. Jatropha yağından biyodizel üretimi için geleneksel yöntemde 7,5:1 alkol/yağ molar oranı, %1,5 potasyum hidroksit (KOH) katalizör oranı, 65 ^{o}C reaksiyon sıcaklığı tercih edilmiş ve dönüşüm işleminin yaklaşık 1 saat sürdüğü gözlemlenmiştir. Mikrodalga tekniği kullanılarak bu sürenin 2 dakikalara kadar azaltıldığı vurgulanmış ve dönüşüm veriminin daha yüksek olduğu görülmüştür [58].

Kumar vd. yaptıkları çalışmada Hindistan cevizi yağından ultrasonik yöntem kullanarak Hindistan cevizi etil esteri üretmiştir. Bu yöntemle biyodizel üretimindeki optimum şartların 6:1 etanol/yağ molar oranı ve %0,75 KOH olduğu belirtilmiştir. Reaksiyonun 7 dakika gibi oldukça kısa bir sürede gerçekleştiğini ve geleneksel yöntemle kıyaslandığında reaksiyon süresinin oldukça kısaldığı sonucuna ulaşılmıştır. Ayrıca, bu koşullarda biyodizel dönüşüm veriminin %98 den fazla olduğu gözlemlenmiştir. Reaksiyon süresindeki kısalmanın maliyetleri azaltabileceği ve sürdürülebilirliğin sağlanabileceği belirtilmiştir [59].

Benzer bir çalışmada, mikro alglerden biyodizel üretimi için ultrasonik sentezleme yöntemi kullanılmıştır. Çalışmada, ultrasonik yöntemle biyodizel üretiminde reaksiyon süresinin kısaldığı belirtilmiştir [21].

Topare vd., atık soya fasulyesi yağı ile yaptıkları çalışmalarında, ultrasonik destekli üretimden faydalanmıştır. Ultrasonikasyon işlemi 20 kHz frekansta gerçekleştirilmiştir. Üretimde 6:1 metanol/yağ molar oranı ve ağırlıkça %1,5 oranında kalsiyum oksit katalizörü kullanılmıştır. Optimum reaksiyon sıcaklığı 70 ^{o}C ve süresi ise 60 dakika olarak seçilmiştir. Bu şartlarda biyodizel üretim veriminin %98 olduğunu tespit edilmiştir. Ayrıca, elde edilen biyodizeli sıkıştırma ateşlemeli motorlarda kullanıldığında dizel yakıtına yakın değerlerde performans ve emisyon değerlerine ulaşıldığı görülmüştür [60].

Ramirez vd., biyodizel üretimi için yarı pilot ölçekte bir ultrasonik reaktörün optimizasyonu ile ilgili yaptıkları çalışmada, 9 litre hacminde ve 1500 W gücünde ultrasonik reaktör ile deneylerini gerçekleştirmiştir. Katalizör miktarının ve reaksiyon süresinin dönüşüm verimi üzerinde önemli ve olumlu bir etkisi olmasına rağmen, alkol/yağ molar oranının sadece etkileşim süresinde önemli olduğu ifade edilmiştir. Yaptıkları optimizasyon sonucundaki ampirik denkleme göre biyodizel üretimi için optimum şartların; ağırlıkça %1,88 katalizör miktarı, 9:1 alkol/yağ molar oranı ve 13 dakika reaksiyon süresi olduğunu ifade etmişlerdir. Bu şartlarda, biyodizel üretim veriminin ise %99 olacağı belirtilmiştir [61].

Gholami vd., biyodizel üretiminde yağ ve alkolün iyi bir karışım olmamasının düşük kütle transfer hızına ve uzun reaksiyon süresine yol açtığını tespit etmiştir. Bu sorunun ultrasonik destekli üretimlerle giderileceğini ancak, tam olarak avantaj ve dezavantajları konusunda belirsizlikler olduğu ifade edilmiştir. Bu yüzden, ultrasonik destekli üretimi konvansiyonel üretimle karşılaştırılarak teknik ve ekonomik bir değerlendirme yapılmıştır. Ultrasonik üretim maliyetinin klasik karıştırıcılı sisteme göre %20,8 oranında daha az maliyetli olduğu, kullanılan toplam enerji miktarları karşılaştırıldığında ise ultrasonik üretimin %6,9 daha az olduğu ve üretilen atık miktarının mekanik karıştırıcılı sisteme göre daha az olduğu belirtilmiştir. Ayrıca, heterojen katalizörlerin ürünlerden kolayca ayrıştıkları için sulu yıkamada atık miktarını daha da azaltacağından heterojen katalizör kullanımıyla birlikte ultrasonik destekli üretimin daha da geliştirilebileceği sonucuna ulaşmışlardır [62].

Bir başka çalışmada araştırmacı, atık kızartma yağından konvensiyonel sisteme göre daha hızlı olan, enerji ve zaman tasarrufu sağlayan ultrasonik yöntem ile biyodizel üretmiş ve

üretilen biyodizeli dizel yakıtı ile hacimsel olarak (%10, %20 ve %50) oranlarda karıştırmıştır. Dizel ve biyodizel yakıt karışımlarını tek silindirli, hava soğutmalı ve direkt enjeksiyonlu bir dizel motorda sabit devirde ve değişik yüklerde denemiştir. Motor deneylerine önce referans yakıtı olan dizel ile başlamış, sonrasında oluşturulan yakıt karışımları ile deney motorunu test etmiştir. Dizel yakıt ile biyodizel karışımlarını kıyaslamıştır. Karışımdaki dizel oranı azaldıkça özgül yakıt tüketiminin dizel yakıta göre arttığını belirtmiştir. Bu artışın biyodizelin ısıl değerinin dizel yakıttan düşük olması nedeniyle karışımların ısıl değerini düşürmesinden kaynaklandığını vurgulamıştır. Ayrıca, CO, HC ve is emisyonlarında azalma olduğunu ve bu azalmanın biyodizelin bünyesinde oksijen bulundurması sebebiyle yanmayı iyileştirmesi olarak belirtmiştir. Son olarak biyodizelin oksijen içermesinin tam yanmaya olanak sağladığı, buna bağlı olarak da sıcaklıkların artması sebebiyle NO emisyonlarında artış görülmüştür [63].

Literatürdeki gıda niteliği taşımayan zeytin ve zeytinyağından üretilen biyodizeller ile yapılan çalışmalar incelendiğinde,

Leila vd. çalışmalarında, gıda niteliği taşımayan zeytinyağıyla mikrodalga destekli transesterifikasyonun (MDT) optimizasyonunu gerçekleştirmiştir. Çalışmada, 3-15:1 aralığındaki farklı metanol/yağ molar oranları ve %0,4-2 arasında katalizör miktarları seçilmiştir. Ayrıca, optimum reaksiyon şartları ile konvansiyonel ısıtma sistemi karşılaştırılmıştır. Metil ester verimi ve saflığın; katalizör miktarı, reaksiyon süresi, metanol-yağ molar oranı ve güç seviyesindeki oranların artışına paralel olarak arttığı ifade edilmiştir. Geleneksel manyetik karıştırıcı transesterifikasyon yöntemiyle karşılaştırıldığında, MDT'nin metil ester verimini etkili bir şekilde artırabileceğini, aynı zamanda reaksiyon süresi ve enerji tüketim miktarını ise azaltabileceği belirlenmiştir. Bu nedenle MDT, zeytinyağının transesterifikasyonu için hızlı bir yöntem olduğu sonucuna ulaşılmıştır [64].

Dorado vd. tarafından yapılan çalışmada, atık zeytinyağı metil esteri ile beslenen direkt enjeksiyonlu dizel bir motorda egzoz emisyonları ve ÖYT farklı çalışma koşullarında incelenmiştir. Biyodizel kullanımında CO, CO_2, NO ve SO_2 emisyonlarında azalma; NO_2 emisyonlarında ise artış olduğu görülmüştür. Ayrıca, biyodizel kullanımıyla ÖYT'de hafif bir artış gösterdiği, ancak bu artışın emisyonlardaki avantajlarının yanında göz ardı edilebileceği ifade edilmiştir. Dizel yakıtına alternatif olarak biyodizelin kullanılabileceği

ve bu sayede fosil yakıt ithalatıyla birlikte çevre kirliliğinin de azaltılabileceği sonucuna varılmıştır [65].

Peker yaptığı çalışmasında, gıda niteliği taşımayan atık zeytinyağından biyodizel elde etmiş ve dizel yakıtı ile çeşitli oranlarda karışımlar oluşturmuştur. Elde edilen biyodizelin ester muhtevasını %97,6 m/m, yoğunluğunu 878,6 kg/m^3, kinematik viskozitesini 4,82 mm^2/s, parlama noktasını 122 ^oC ve su muhtevasını 156 mg/kg olarak bulmuştur. Sonuç olarak; gıda niteliği olmayan zeytinyağından elde edilen biyodizelin, dizel ile karışım oluşturularak sıkıştırma ateşlemeli motorda kullanımının uygun olduğunu ortaya koymuştur. Yapılan çalışmada, üretilen biyodizelin analiz sonuçlarının standart değerler içerisinde yer almasından dolayı; gıda niteliği olmayan zeytinyağının diğer atık yağ veya endüstriyel yağlarla karıştırılarak biyodizel üretiminde kullanılabileceği ifade edilmiştir [66].

Yapılan diğer bir çalışmada, atık zeytinyağından elde edilen biyodizel, hacimsel olarak %30 oranında dizel yakıt ile karıştırılmış ve tek silindirli direkt enjeksiyonlu bir dizel motorda yakıt olarak kullanılmıştır. Motor performansı ve egzoz emisyonlarına etkisini incelemek amacıyla 2200 d/d sabit motor hızında ve dört farklı motor yükünde gerçekleştirilen deneylerde, ısıl verimin dizel yakıtına göre %5 oranında azaldığı tespit edilmiştir. Ayrıca, CO emisyonu %37,5 oranında azalırken, CO_2 ve NO emisyonlarının sırasıyla %41 ve %9,5 oranlarında yükseldiği gözlemlenmiştir. İs emisyonun ise dizele kıyasla %37,5 oranında azaldığı görülmüştür [67].

Arslan tarafından gerçekleştirilen bir çalışmada, laboratuvar ölçekli kurduğu bir biyodizel tesisinde yabani zeytinden elde edilen yağdan biyodizel üretilmiştir. Bu çalışmada, üretilen biyodizelin en önemli parametrelerinden olan kinematik viskozitesi ile özgül ağırlığı, iyot sayısı, parlama noktası ve ısıl değer gibi bazı özellikleri incelenmiştir. Yapılan çalışmalar sonucunda, üretilen biyodizelin kinematik viskozitesinin 4,93 mm^2/s, özgül ağırlığının 0,883 g/cm^3, iyot sayısının 82 g iyot/100g ve ısıl değerinin 41300 kJ/kg olduğu görülmüştür. Bu değerlerin TS 14214 standartı içerisinde yer aldığı ifade edilmiştir [68].

Sanchez ve Vasudevan katalizör olarak Novozym 435'in kullanıldığı çalışmalarında; zeytinyağından metil ester üretimi için optimum oranları belirlemiştir. Buna göre optimum metanol/yağ molar oranının 8:1 ve reaksiyon sıcaklığının 60 ^oC olması gerektiği

ifade edilmiştir. Bu şartlarda dönüşüm veriminin yaklaşık %95 oranında gerçekleştiği belirtilmiştir [69].

Rajaeifar vd. zeytinyağı biyodizelinin üretimi ve tüketiminin yaşam döngüsü üzerindeki çevresel etkilerini değerlendirmek amacıyla yaptıkları çalışmalarında; zeytinyağı biyodizeli ile dizel yakıtını karşılaştırmıştır. Elde ettikleri sonuçlara göre; insan sağlığı ve ekosistem kalitesi bakımından saf biyodizelin en kötüsü olduğunu belirtmişlerdir. Bunun sebebini ise tarımsal üretimde gerçekleşen emisyonlar ve biyodizelin dizele göre daha yüksek NO emisyon oluşturması olarak açıklanmıştır. İklim değişikliği ve doğal kaynaklara zararları bakımından karşılaştırdıklarında ise, biyodizel yakıtının en iyi, dizelin ise en kötüsü olduğunu belirtmişlerdir. Yine çalışmada ulaştıkları sonuçlara göre, B20 (%20biyodizel+%80dizel) yakıtının dizele iyi bir alternatif olabileceği tespit edilmiştir [70].

Dizel motorlarda püskürtme avansı ve basıncının değişimin etkileri üzerine yapılan çalışmalar incelendiğinde

Gümüş vd. yakıt olarak kanola yağı metil esteri kullanılan tek silindirli bir dizel motorda püskürtme basıncı değişiminin (18, 20, 22, ve 24 MPa) performans, emisyon ve yanma karakteristikleri üzerine etkilerini incelemiştir. Enjeksiyon basıncının artırılmasıyla karışım içerisindeki biyodizel oranı yüksek olan yakıtlarda ÖYT azalmıştır. Bunun yanı sıra, basıncın artırılması CO, HC ve is emisyonlarında düşüşe sebep olurken CO_2, O_2 ve NO emisyonlarını artmıştır [71].

Jayabal vd. biyodizel/dizel karışımlarıyla çalışan CRDI yakıt sistemine sahip bir dizel motorda enjeksiyon zamanlamasının yanma, motor performansı ve emisyon özellikleri üzerindeki etkilerini incelemiştir. Enjeksiyon zamanının 21 KA ve EGR oranının %15 olması durumunda biyodizel kullanımıyla NO emisyonu dizel yakıtına göre %60 oranında azalmıştır. Ayrıca, enjeksiyon zamanı 25 KA'den 21 KA'ye alındığında silindir içi basınçların ve açığa çıkan ısı oranı (HRR) düştüğü belirtilmiştir [72].

Qi vd. yakıt olarak biyodizel kullanılan dizel bir motorda EGR ve püskürtme avansının yanma ve egzoz emisyonlarına etkisini araştırmıştır. Ana enjeksiyon zamanlaması geciktirildiğinde ÖYT'de bir miktar artış olurken NO emisyonunda kayda değer bir azalma olmuştur. İs emisyonunda ise değişim olmamıştır. Ayrıca, ana enjeksiyon

zamanlamasının geciktirilmesi ikinci tepe basıncını oldukça azaltmış ve açığa çıkan ısı oranı bir miktar artırmıştır [73].

Surya vd. CI motorda hidrojenle zenginleştirilmiş pirinç kepeği biyodizelini yakıt olarak kullanarak püskürtme basıncı ve püskürtme avansının etkisini incelemiştir. Deneylerde püskürtme basıncı 220, 240 ve 260 bar olarak seçilmiştir. Püskürtme avansı ise 20, 22, 24 ve 26 KA olacak şekilde belirlenmiştir. Araştırmacılar püskürtme basıncının 240 bar, avansının ise 24 KA olduğu deney şartlarında motor performansı, emisyon ve yanmanın iyileştiğini belirtmiştir. Aynı deney şartlarında NO emisyonlarında artış gözlemlemiştir. Fakat, motor performansındaki iyileşme ve emisyonlardaki azalma düşünüldüğünde NO miktarındaki artışın göz ardı edilebileceği vurgulanmıştır [74].

Deokar vd. biyodizel ile çalıştırılan bir dizel motorda püskürtme basıncı, püskürtme avansı ve enjektör geometrisinin performans ve emisyonlar üzerindeki etkisini araştırmıştır. Çalışma, 210, 230, 250 bar'lık üç farklı püskürtme basıncı ve 20, 23, 26 KA'lık üç farklı püskürtme avansı ile gerçekleştirilmiştir. Araştırmanın sonuçlarına göre püskürtme basıncının 230 bar ve püskürtme avansının 26 KA olduğu şartlarda ısıl verimin ve NO emisyonlarının yükseldiği HC, is ve CO emisyonlarının azaldığı belirtilmiştir [75].

Elumalai vd. biyodizel, dizel ve N-bütanol karışımlarını CI motorda kullanılarak püskürtme avansının egzoz emisyonları üzerindeki etkisini incelemiştir. Püskürtme avansı 21 ile 25 KA arasında değiştirilmiştir. 21 KA'da yapılan deneylerde NO ve CO dizele göre sırasıyla yüzde 49 ve yüzde 5,88 azalmıştır. 25 KA'da yapılan deneylerde ise is ve HC emisyonu dizele göre sırasıyla %40 ve %38,07 oranında azalmıştır. Ayrıca, 25 KA'da yapılan deneylerde termik verim dizel yakıtla karşılaştırıldığında %15,30 artmıştır [76].

Channappagoudra vd. biyodizel ve CNG (doğalgaz) ile çalıştırılan direkt enjeksiyonlu dizel motorda püskürtme avansı ve basıncının motor performansı, yanma ve egzoz emisyonları üzerine etkisini araştırmıştır. En uygun yakıt karışımını B20 (B10, B20, B30 ve B100 arasından), püskürtme basıncını 230 bar (210, 220, 230 ve 240 bar arasından), püskürtme avansını ise 26 KA (20, 23, 26 ve 29 KA arasından) olarak seçmiştir. Bu deney değişkenlerinin daha iyi motor performansı, yanma ve egzoz emisyonu sonuçları verdiği belirtilmiştir [77].

Gaddigoudar vd. biyodizel ile çalışan çift yakıtlı motorda püskürtme avansının motor performansına etkisini araştırmıştır. Püskürtme basıncını 260 bar sabit tutarak dört farkı püskürtme avansında (19, 23, 27 ve 31 KA) deneyler gerçekleştirilmiştir. Püskürtme avansının 27 KA'ya kadar artırılması motor performansını iyileşmeye, is, HC ve CO emisyonlarını azalmaya, NO emisyonlarında ise artışa yol açmıştır. Avansın 27 KA'dan 31 KA'ya artırılmasıyla motor performansında düşüş is, HC ve CO emisyonlarında ise artış gözlenmiştir. Ayrıca, NO emisyonlarını da düşüş gerçekleşmiştir. Yapılan deneyler neticesinde en uygun püskürtme avansının 27 KA olduğu görülmüştür [78].

Kumar vd. enjeksiyon basıncının yanma, motor performansı ve egzoz emisyonları üzerindeki etkilerini incelemiştir. Deneylerde enjeksiyon basıncını 180, 210 ve 240 bar olarak belirlemişlerdir. Basıncın artırılmasıyla termik verim ve NO emisyonları artarken ÖYT, is ve HC emisyonları ise azalmıştır. Ayrıca, enjeksiyon basıncının 240 bar olması yanmayı iyileştirerek ısı salınımını hızlandırmış ve silindir gaz basıncını yükseltmiştir [79].

Kartic vd. yenilenebilir yakıtla çalışan dizel motordaki emisyonları azaltmak için enjeksiyon basıncı ve zamanlaması üzerine yaptıkları çalışmada, yakıt olarak B30, B70 ve B100 yakıtlarını kullanmıştır. Deney motorunun orijinal püskürtme avansı 23 KA püskürtme basıncı ise 200 bar'dır. Deneyleri üç farklı püskürtme avansı (21, 23 ve 25 KA) ve dört farklı püskürtme basıncında (200, 220, 240 ve 260 bar) gerçekleştirmiştir. Termik verim ve NO emisyonları 240 bar püskürtme basıncına kadar artmış fakat basıncın 260 bar olması durumunda azalmıştır. ÖYT ve CO püskürtme basıncının artırılmasıyla birlikte 240 bar'a kadar düşmüş, 240 bar'dan sonra yükselmiştir. Püskürtme avansının 21 ve 23 KA olduğu durumlarda termik verim düşerken 25 KA'da artmıştır. Maksimum ısı salınımı 25 KA püskürtme avansında ve 240 bar püskürtme basıncında gerçekleşmiştir [80].

1.4. Çalışmanın Amacı

Bu çalışmada, sıkıştırma ateşlemeli motorlar için dizel yakıtına alternatif ürün geliştirilmesi ve motorda optimum kullanım koşullarının belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu amaç için, ülkemizde de yetiştiriciliği yapılan zeytinin doğal yollarla toprağa düşerek atık haline gelmiş olanlarından ultrasonik destekli transesterifikasyon yöntemiyle biyodizel

elde edilmiştir. Genellikle sabun yapımında kullanılan bu tarz ürünlerin ekonomiye geri kazandırılması bu çalışmanın diğer amaçlarından biridir.

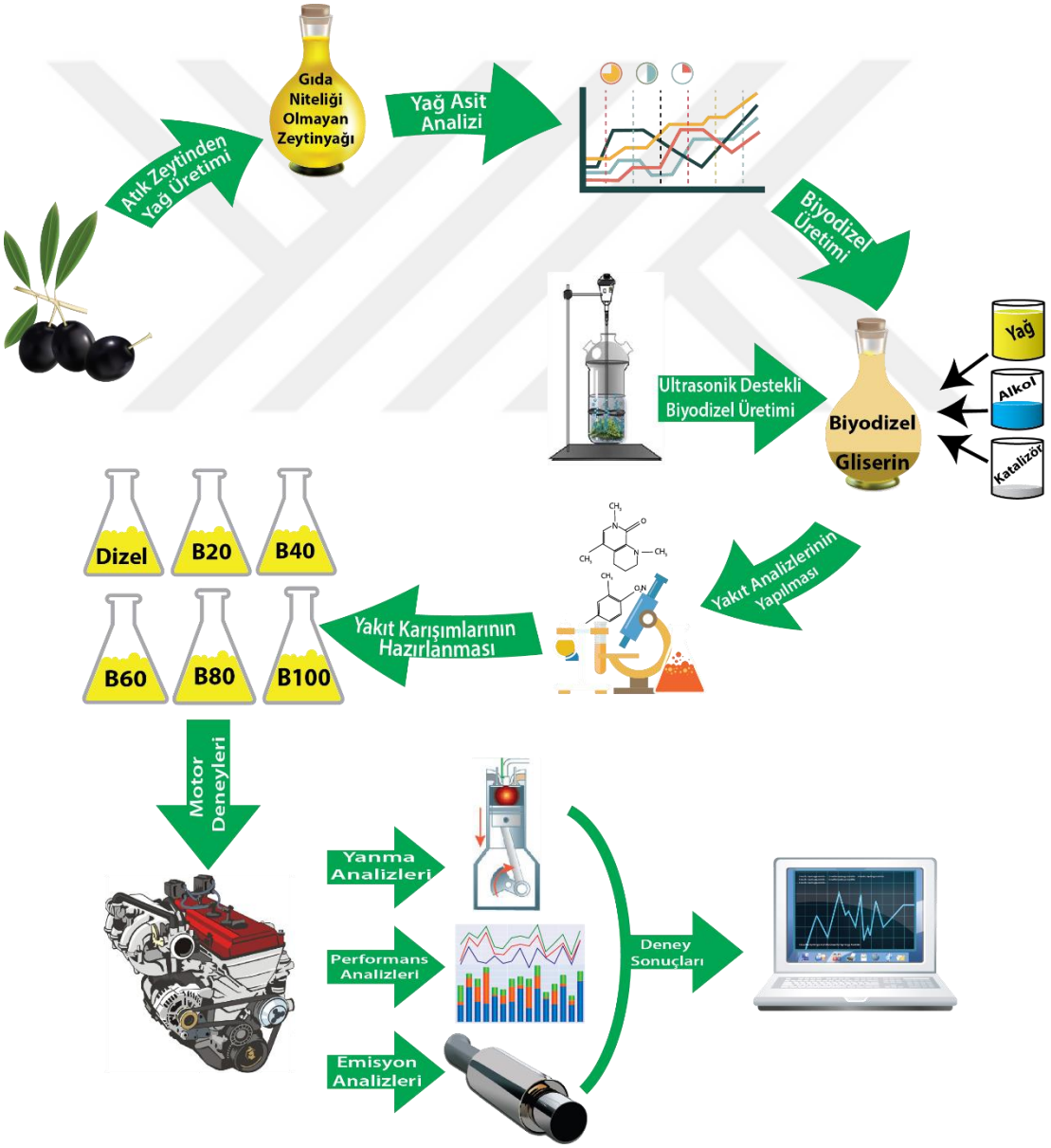
Çalışma ile ulaşılması düşünülen hedefler aşağıda verildiği şekilde sıralanabilir:

- Türkiye, zeytin ve zeytinyağı üretiminde dünyada önemli bir konumdadır. Bu çalışmada atık olarak nitelendirilen zeytinin, kaynağında toplanarak yağ üretilmesi, üretilen yağın özelliklerine göre uygun bir yöntemle biyodizel üretilerek hem atık değerlendirilmesi hem de dizel yakıtı yerine kullanılabilecek verimli, ucuz ve çevreci alternatif bir yakıt üretilmesi planlanmıştır.
- Atık zeytinlerin biyodizel üretiminde kullanılması ile; zeytinciliğin yoğun olarak yapıldığı bölgelerin kalkınması ve bölgedeki istihdamı arttırması amaçlanmıştır.
- Ülkemizde yeteri kadar petrol rezervi bulunmadığından, Türkiye petrol ve türevlerinde dışa bağımlı bir ülke konumundadır. Bu anlamda yapılacak olan alternatif yakıt çalışmaları enerji ihtiyacının azaltılmasına yardımcı olacaktır.
- Üretilen yakıt ile yapılan motor performans, emisyon ve yanma analizleri ile yakıtın verimli bir şekilde kullanılarak, yakıt tüketimin ve emisyonların azaltılması hedeflenmiştir.

2. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu bölümde kullanılan materyal ve yöntem, detaylı olarak irdelenmiştir. Deneysel çalışmada işlenen yöntem ve işlem basamakları Şekil 2.1.'de ayrıntılı olarak verilmiştir. İşlem basamakları sırasıyla;

- Ön iyileştirme (esterifikasyon)
- Ultrasonik destekli biyodizel üretimi
- Motor testleri
- Hesaplama ve analiz



Şekil 2. 1. Çalışma yönteminin şematik olarak gösterimi

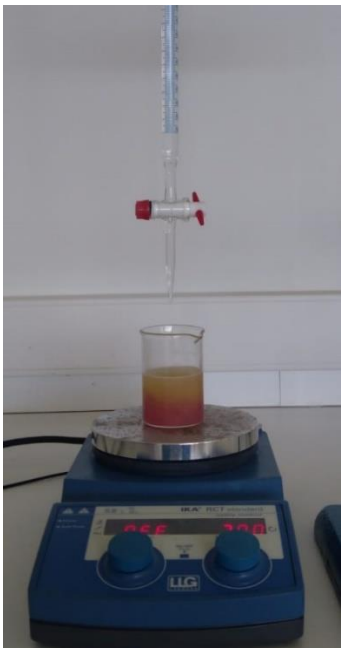
2.1. Atık Zeytinyağının Yağ Asidi Dağılımı

Biyodizel üretimine başlamadan önce atık zeytinyağının serbest yağ asidi ve yağ asit dağılımı belirlenmiştir. Biyodizel dönüşümünde kullanılacak olan yağın serbest yağ asit değeri yüksek ise, baz katalizör kullanımı sırasında sabunlaşmayı engelleyebilmek için öncelikle ön iyileştirme (esterleştirme) işlemine tabi tutulması gerekmektedir. Bu çalışmada, kullanılacak yağın serbest yağ asidi AOCS Ca-5a-40 metodu ile belirlenmiştir. Testte; 5 gr yağ numunesi, 1:1 v/v etanol:dietil eter karışımı içinde çözündürüldükten sonra fenolftalein indikatörlüğünde 0,1 N etanollü KOH çözeltisi ile titre edilmiştir. Serbest yağ asidi tayin işlemi Şekil 2.2'de verilmiştir. Bu işlem sırasında karışım rengini sürekli olarak pembe hale getiren KOH çözelti miktarı, aşağıdaki bağıntıda yerine yazılarak oleik asit cinsinden serbest yağ asit değeri belirlenmiştir. Titrasyon sonucunda; m=5 gr yağ için karışımı sürekli pembeye dönüştüren KOH çözelti sarfiyatı V=41,44 ml olarak belirlenmiştir. Buna göre serbest yağ asidi,

$$\text{Serbest yağ asidi } (\%) = \frac{V}{m} \cdot 2{,}82 \ \ (\text{oleik asit cinsinden})$$

$$\text{Serbest yağ asidi } (\%) = \frac{41{,}44}{5} \cdot 2{,}82 = \%23{,}34$$

olarak belirlenmiştir.



Şekil 2. 2. Serbest yağ asit tayini

Transetirifikasyon ile biyodizel eldesinde yüksek dönüşüm verimi elde edebilmek için serbest yağ asidinin %1 civarında olması gerekmektedir [81,82]. Bu çalışmada, asit değerini düşürme amacıyla yapılan ön iyileştirme için asit esterifikasyon yöntemi uygulanmıştır. Esterifikasyon ile ilgili açıklamalar Bölüm 2.2' de ayrıntılı olarak verilmiştir. Ayrıca, ham yağın yağ asit içeriklerinin belirlenmesi de önemli olduğundan biyodizel üretimine geçmeden bu içerikler belirlenmiştir. Yağ asitlerinin kompozisyonu ve miktarının tayini IUPAC 2.302 metodu ile gaz kromatografisi cihazında (Thermo Scientific Trace 1310) belirlenmiştir. Ayrıca, ön iyileştirme sonucu SYA'sı düşürülen yağ ve üretilen biyodizelin de yağ asitlerinin grafik alan yüzdelerinin %0,2'den daha yüksek olanları Tablo 2.1.'de özetlenmiştir.

Tablo 2. 1. Doymuş ve doymamış yağ asit oranları

Yağ asidinin genel ismi		**Karbon sayısı**	**Bileşik oranları (%)**		
			Atık zeytinyağı	**Ön iyileştirme yapılmış yağ**	**Atık zeytinyağı metil esteri**
Doymamış yağ asitleri	Palmitoleik asit	C16:1	2,98 ±0,055	0,71±0,01	0,70±0,02
	Linoleik asit	C18:2n6c	10,01±0,04	17,57±0,12	14,70±0,2
	Elaidik asit	C18:1n9t	4,36±0,01	2,45±0,15	2,10±0,3
	Oleik asit	C18:1n9c	45,5±0,02	41,27±0,14	39,65±0,15
	Heptadekenoik asit	C17:1	0,83±0,06	1,37±0,01	1,34±0,01
	Alpha linolenik asit	C18:3n3	2,41±0,02	3,56±0,015	3,52±0,04
	Eikosenoik asit	C20:1	1,31±0,035	2,09±0,045	2,00±0,1
Doymuş yağ asitleri	Palmitik asit	C16:0	17,61±0,025	23,08±0,3	22,82±0,16
	Stearik asit	C18:0	9,09±0,03	1,14±0,2	1,98±0,2
	Behenik asit	C22:0	0,59±0,07	1,07±0,06	1,08±0,17
	Heptadekanoik asit	C17:0	0,42±0,05	0,58±0,03	0,53±0,1
	Arasidik asit	C20:0	1,76±0,04	2,51±0,01	2,51±0,05
	Trikosanoik asit	C23:0	3,35±0,08	0,04±0,01	0,03±0,01
Doymamış yağ asitlerinin toplamı (%)			66,5	67,5	64
Doymuş yağ asitlerinin toplamı (%)			32	28.5	28

Tablo 2.1.'de gösterilen yağ asitlerinin karbon sayıları, bileşiği oluşturan karbon sayısını ve bağ şeklini ifade etmektedir. Örneğin palmitoleik asit (C16:1) 16 karbonlu ve 1 adet çift bağ olduğunu belirtmektedir. Çift bağlı asitler doymamış yağ asidi olarak ifade edilmektedir. Buna göre, ham yağın doymamış yağ asitlerinin oranının toplamda %66,5 civarında olduğu görülmektedir. Doymuş yağ asit oranı ise %32 olduğu tespit edilmiştir. Her üç numune için de yağ asit dağılımlarını belirlemek için 3'er defa ölçüm yapılmış ve yapılan denemelerin ortalaması alınarak tabloya yazılmıştır. Ayrıca, her bir asit değerinin yanına belirsizlik değerleri hesaplanarak eklenmiştir. Yağın moleküler ağırlığı da yaklaşık 280 g/mol ($M_{yağ}$) olarak hesaplanmıştır.

2.2. Ham Yağın Ön İyileştirmesi (Esterifikasyonu)

Biyodizel üretiminde kullanılacak atık zeytinyağının SYA'sının oleik ait cinsinden %23,34 çıkmasından dolayı yağa ön işlem uygulanarak SYA'sı %1'in altına düşürülmüştür. Ön iyileştirmeye başlamadan önce ham atık zeytinyağı bir kâğıt filtreden geçirilerek tortu ve kalıntılar temizlenmiştir. Daha sonra, yağın içerisinde bulunabilecek suyun reaksiyonu olumsuz yönde etkilememesi için yağ 110 ^{o}C'de 2 saat boyunca ısıtılmıştır.

2.2.1. Taguchi yöntemi ile optimizasyon

Bu çalışmada deney tasarımı metotlarından biri olan Taguchi yöntemi kullanılmıştır. Tagucgi deney tasarımı; kalitede devamlılığın sağlanabilmesi için sistemi etkileyen parametrelerin iyileştirilmesi için uygulanan bir yöntemdir. Ürün veya prosese ait parametreler arttıkça yapılacak olan deney sayısı artışıyla maliyet de yükselmektedir. Yöntemde uygulanacak deney sayısı Eş. (2.1)'deki eşitlik ile hesaplanmaktadır [83]. Burada;

$$N = (L - 1) * P + 1 \quad (2.1)$$

N : Deney sayısını

L : Seviye sayısını

P : Parametre sayısını ifade etmektedir.

Parametrelerin ürün veya prosesi ne denli etkilediği ortalama ve varyans bilgileri kullanılarak minimum deney sayısıyla tespiti yapılabilir.

Ön iyileştirme işleminde asit esterifikasyon yöntemi seçilmiştir. Katalizör olarak sülfürik asit (H_2SO_4) seçilmiş ve oranlar ile deney değişkenleri belirlenmiştir. Değişken olarak; sülfürik asit oranı (A), metanol oranı (B) ve karıştırma hızı (C) seçilmiştir. Her bir değişkenin oranları Tablo 2.2'de verilmiştir. Asit katalizör oranı birinci bölümdeki literatür çalışmalarının birçoğunda yapılanın aksine kullanılan toplam yağ miktarına göre değil, yağın serbest yağ asidi içeriğine yöre yüzdesel olarak belirlenmiştir.

Tablo 2. 2. Deney değişkenleri ve seviyeleri

Faktör kodu	**Açıklama**	**Seviye**			
		1	**2**	**3**	**4**
A	SYA miktarına göre asit katalizör mitarı (%)	20	25	30	35
B	Yağ methanol oranı (Molar)	16:1	18:1	20:1	22:1
C	Karıştırma hızı (d/d)	300	400		

Belirlenen bu değişkenler ile Taguchi L16(4^2 2^1) deney tasarımı kullanılarak Tablo 2.3'teki deney şartları belirlenmiştir. Normal şartlarda toplam 256 deney yapılması gerekirken yapılan tasarım ile bu sayı 16'ya indirgenerek optimum deney koşulları tespit edilmiştir. Bu işlemin amacı en yüksek verimi elde etmek, deney sayısını azaltmak ve en uygun metanol ile sülfürik asit miktarını bulmaktır.

2.2.2. Ön İyileştirme (esterifikasyon) Sonuçlarının Optimizasyonu

Deney sürecindeki her bir deney 50 ^oC sabit sıcaklıkta gerçekleştirilmiştir. Bütün deneyler 3 defa tekrarlanmış ve ortalama değerleri alınarak belirsizlik analizi yapılmıştır (Tablo 2.3).

Tablo 2. 3. Taquchi deney tasarımı ve deneysel sonuçları

Test no	Deney değişkenleri			SYA (%)	Belirsizlik
	A (asit katalizör miktarı)	B (metanol molar oranı)	C (karıştırma hızı)		
1	1	1	1	2,171	±0,81
2	1	2	1	1,764	±0,68
3	1	3	2	1,416	±0,71
4	**1 (20%)**	**4 (22:1)**	**2 (400 d/d)**	**0,564**	**±0,22**
5	2	1	1	1,442	±0,59
6	2	2	1	1,123	±0,43
7	2	3	2	0,987	±0,37
8	2	4	2	0,620	±0,28
9	3	1	2	1,345	±0,65
10	3	2	2	1,128	±0,54
11	3	3	1	1,026	±0,46
12	3	4	1	0,976	±0,34
13	4	1	2	1,412	±0,61
14	4	2	2	1,184	±0,46
15	4	3	1	1,059	±0,39
16	4	4	1	1,015	±0,41

Tablo incelendiğinde en düşük SYA değerinin 0,564 ile dört numaralı deneyde elde edildiği görülmüştür. Buna göre, en uygun deney koşullarının SYA cinsinden ağırlıkça %20 sülfürik asit (A1), 22:1 metanol/yağ molar oranı (B4) ve 400 d/d (C2) karıştırma hızı olduğu tespit edilmiştir. Bu yöntem ile kullanılan sülfürik asit miktarının yağın ağırlığına göre değil SYA'ya göre belirlenmesi sonucuna varılmıştır. Böylece gereksiz asit katalizör kullanımı engellenmiştir. Böylelikle yakıtta olası fazla kükürt oluşumunun önüne geçilmiştir.

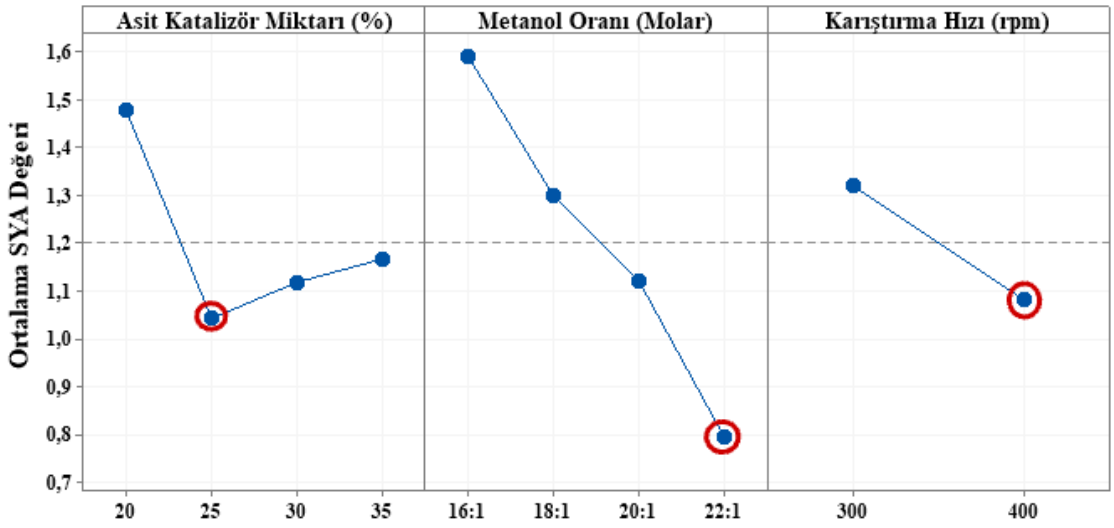
2.2.3. Sinyal/gürültü (S/N) oranları ve varyans analizi

Taguchi yönteminin uygulanmasındaki temel amaç hedeflenen kalite değerine mümkün olduğunca yaklaşmak ve hedef değerden sapmayı (varyansı) minimum değere düşürmektir. Deney verileriyle hedeflenen değer arasındaki sapma kayıp fonksiyonuyla hesaplanarak S/N oranına çevrilir. Bu oran en büyük en iyi, en küçük en iyi ve hedef değer en iyi olarak üç farklı hedef değere tanımlanmıştır. Tablo 2.4'te proses optimizasyon hedefine göre S/N hesaplamaları verilmiştir.

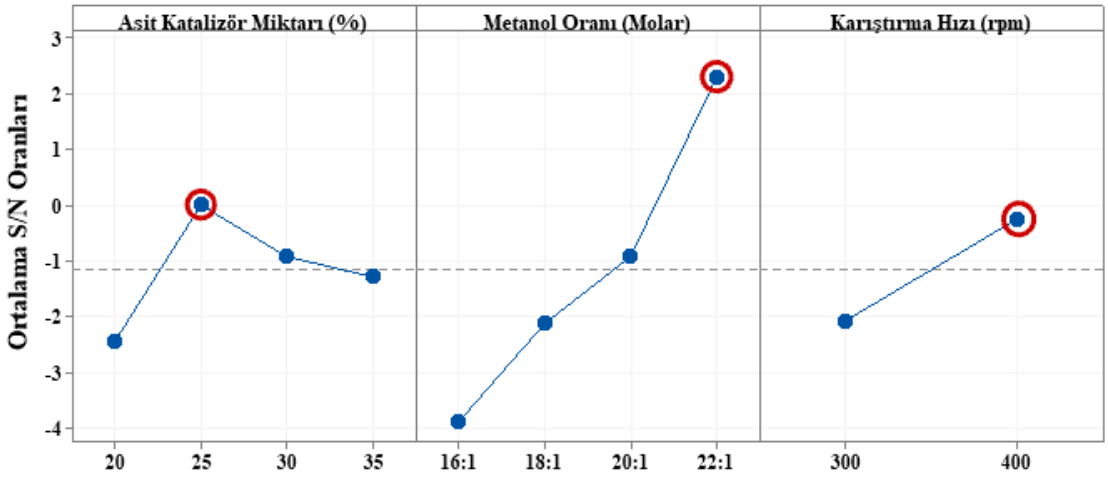
Tablo 2. 4. Proses optimizasyon hedefine göre S/N hesaplamaları

Seçim	**Amaç**	**Sonuç**
En büyük en iyi: $\frac{S}{N} = -10(\log(\sum(\frac{1}{Y^2})/n))$	Sonucu maksimize etmek	Pozitif
***Her değer en iyi*:** $\frac{S}{N} = -10(\log(s^2))$	Yalnızca standart sapmayı azaltmak	Pozitif, sıfır veya negatif
Hedef değer en iyi: $\frac{S}{N} = -10(\log(\bar{Y}^2)/s^2)$	Standart sapma ile ortalamanın belli bir hedef değerde olması	Ortalama sıfır olduğu zaman standart sapma da sıfır
En küçük en iyi : $\frac{S}{N} = -10\log(\sum Y^2/n))$	Sonucu minimize etmek	Pozitif

Şekil 2.3'te deneysel değişkenlerin SYA'ya etkisi, Şekil 2.4'te deneysel değişkenlerin S/N oranları verilmiştir. Şekil 2.3 incelendiğinde, reaksiyonda %25 asit katalizör oranına kadar SYA değeri azalırken, bu değerden sonra tekrar yükseldiği görülmektedir. Asit katalizörün (sülfürik asit) SYA açısından en etkili miktarının yağ asidi ağırlığınca %25 (A2) olduğu belirlenmiştir. Ön iyileştirme işleminde SYA'yı azaltmada en önemli faktörün metanol oranı olduğu görülmüştür.



Şekil 2. 3. Deneysel değişkenlerin SYA'ya etkisi



Şekil 2. 4. Deneysel değişkenlerin S/N oranları

S/N oranlarından elde edilen optimum seviyeler grafik üzerinde kırmızı bir kutu içinde işaretlenmiştir. En yüksek S/N oranına sahip oranlar, ön iyileştirme işleminde en düşük SYA'nın elde edilmesine katkıda bulunan optimum değerleri gösterir. Bu çalışmada, S/N oranları için en düşük SYA'yı değerlendirmek için Smaller is better (daha küçük-daha iyi) teoremi kullanılmıştır.

2.3. Transesterifikasyon İşlemi

Ön iyileştirme neticesinde SYA değeri biyodizel üretimi için uygun hale getirilmesi amaçlanmıştır. Bu bağlamda, transesterifikasyon işleminden önce esterifikasyon

reaksiyonunda oluşabilecek suyun azaltılması için yağ 110 ^{o}C'de 1 saat boyunca ısıtılmıştır. Biyodizel üretiminde %99,9 saflıkta Sigma-Aldrich marka metanol (CH_3OH), katalizör olarak ise Merck marka potasyum hidroksit (KOH) kullanılmıştır. Zaman ve dönüşüm verimi açısından en uygun biyodizel üretim yöntemini belirlemek amacıyla transesterifikasyon işlemi 3 farklı şekilde gerçekleştirilmiştir. İlk olarak, klasik ısıtma ile daha sonra ultrasonik banyo ile son olarak da ultrasonik homojenizatör ile üretim gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlara bağlı olarak en uygun yöntem belirlenmiştir.

2.3.1. Klasik ısıtma ile transesterifikasyon işlemi

Bu üretim yönteminde literatürde kabul görmüş olan 60 (±5) ^{o}C sıcaklık, 6:1 yağ/metanol molar oranı ve %1 KOH deney şartları belirlenmiştir. Bu deney şartlarında atık zeytinyağı 1 saat boyunca 500 d/d'de karıştırılarak transesterifikasyon işlemi gerçekleştirilmiştir. Reaksiyon sırasında karışımdaki metanolun buharlaşmaması için geri soğutucu kullanılmış ve sıcaklık kontrol edilmiştir. Daha sonra, karışım ayırma hunisine alınarak 24 saat boyunca bekletilmiştir. Bu sürenin sonunda gliserin ve metil ester ayrımı gerçekleştiği için gliserin başka bir kaba alınarak, atık zeytinyağı metil esteri elde edilmiştir. Elde edilen metil esterin dönüşüm verimi yaklaşık %91,77 olarak hesaplanmıştır.

2.3.2. Ultrasonik banyo ile trasesterifikasyon işlemi

Bu yöntemde ham yağın içerisine ağırlıkça 6:1 molar oranda metanol ve %1 KOH ilave edilmiştir. Su banyosu sıcaklığı 60 (±5) ^{o}C'ye ayarlanarak 1 saat boyunca ultrasonik banyoda karıştırma ve ısıtma işlemi gerçekleştirilmiştir. Daha sonra, karışım ayırma hunisine alınarak 24 saat boyunca bekletilmiştir. Bu sürenin sonunda, gliserin ve metil ester ayrımı gerçekleştiği için gliserin ayrı bir kaba alınarak, atık zeytinyağı metil esteri elde edilmiştir. Elde edilen metil esterin dönüşüm verimi %97,82 olarak hesaplanmıştır. Ultasonik banyo Şekil 2.5'te verilmiştir:

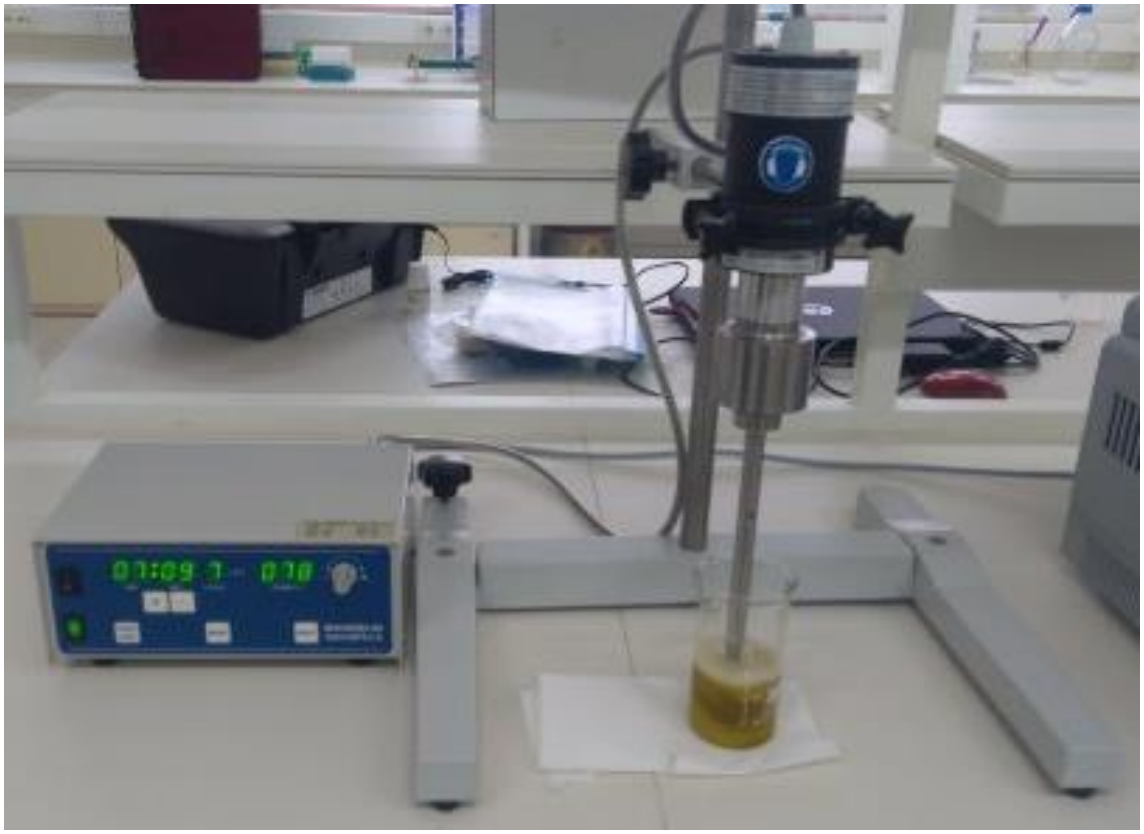


Şekil 2. 5. Ultrasonik banyo

2.3.3. Ultrasonik homojenizatör ile transesterifikasyon işlemi

Bu yöntemde, transesterifikasyon reaksiyonu Şekil 2.6'da gösterilen Bandelin Sonopulse HD 2200 sonikatör homojenleştirici ile gerçekleştirilmiştir. Ham yağın içerisine molar oranın yaklaşık 6:1'ine denk gelen ağırlıkça %20 metanol ve %1 KOH ilave edilerek 10 dakika boyunca karıştırma işlemi gerçekleştirilmiştir. Cihazın maksimum güç çıkışı 20 kHz frekansında 200 W'tır. Cihazda 13 mm çapında titanyum düz uçlu prob kullanılmıştır. Bir litrelik yağ numunesi için kullanılacak KOH ve metanol miktarları belirlenmiştir. İlk olarak, KOH metanol içerisine konulmuş ve homojen bir karışım elde etmek için manyetik karıştırıcı ile bir dakika karıştırılmıştır. Elde edilen bu metoksit karışımı yağ numunesine ilave edilerek reaksiyon işlemi başlatılmıştır. Cihaz %75 sonikatör genliği ve %70 görev döngüsüne ayarlanarak ortam sıcaklığında 10 dakikalık bir reaksion gerçekleştirilmiştir. Deneyler sonunda reaksiyon sıcaklığının 45-55 ^{o}C aralığında değiştiği gözlemlenmiştir. Görev döngüsü (cycle), 1 saniyedeki darbe tekrarını, %70 görev döngüsü ise, cihazın darbeyi 1 saniyenin 0,7'sinde ve bir sonraki darbenin aralığını da 0,3 saniyede yaptığını ifade etmektedir. Buna göre, cihaz 10 dakikalık

deneyler sırasında numuneye 420 tekrar darbe uygulamıştır. Elde edilen metil esterin dönüşüm verimi hesaplanmış ve %98,72 olarak bulunmuştur.



Şekil 2.6. Ultrasonik homojenizatör

Testlerde kullanılacak biyodizel için 3 farklı yöntem karşılaştırılmış, zaman ve dönüşüm verimi açısından maksimum dönüşüm verimine sahip ultrasonik homojenizator tercih edilmiştir. Cihazda elde edilen karışım Şekil 2.7'de gösterilen ayırma hunisine alınarak 24 saat boyunca bekletilmiştir. Bu sürenin sonunda gliserin ve metil ester ayrımı gerçekleştiği için gliserin başka bir kaba alınarak, atık zeytinyağı metil esteri elde edilmiştir. Motor testleri için ultrasonik homojenizatör destekli toplam 30 litre biyodizel üretilmiştir.



Şekil 2. 7. Ayırma hunisinde gliserin ve metil ester karışımı

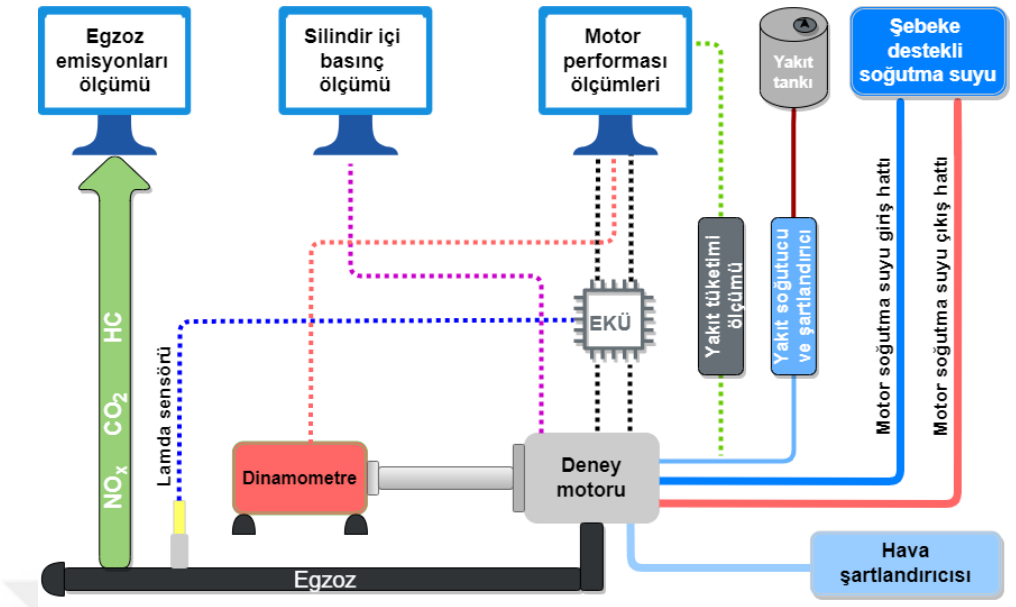
Daha sonra, ester içerisindeki katalizör ve gliserinin tam olarak ayrışabilmesi için yıkama işlemine tabi tutulmuştur. Bu işlem 2 defa tekrarlanmıştır. Yıkama işlemi sonrasında su ve metil ester birbirinden ayrılmıştır. En sonunda, metil ester içerinde olası alkol ve su içeriğini uzaklaştırmak için metil ester 110 ^{o}C'de 1 saat boyunca ısıtılarak içerisindeki suyun tamamen buharlaşması sağlanmıştır. Motor testlerinden önce üretilen biyodizelin yakıt sisteminde sorun oluşturmaması ve yakıtın içerisinde herhangi yabancı madde kalmaması için Şekil 2.8'de gözüken vakum pompası yardımı ile 40 mikron fitre ile filtrelenmiş ve dizel bir motorda doğrudan kullanılabilecek duruma getirilmiştir.



Şekil 2. 8. Vakum pompası ile filtreleme

2.4. Deney Donanımı

Deney donanımı; tek silindirli test motoru, Eddy Current dinamometresi, egzoz gaz analizörü, hava ve yakıt tüketimi ölçüm düzeneği ve silindir içi basınç ölçüm sisteminden oluşmaktadır. Testler TÜBİTAK Raylı Ulaşım Teknolojileri Enstitüsünde (RUTE) gerçekleştirilmiştir. Deney düzeneğinin şematik görünümü Şekil 2.9'da verilmiştir. Deneylerde kullanılan ölçüm cihazlarının listesi ve hassasiyetleri Tablo 2.5'te verilmiştir.



Şekil 2. 9. Deney donanımının şematik görünümü

Tablo 2. 5. Deney dolanımında bulunan cihazlar ve hassasiyetleri

Ölçüm parametreleri	Cihaz	Hassasiyet
Tork	HBM Tork Flanşı	± %0,1
Motor hızı	AVL encoder	≤ ± 0,1 °KA
Test hücresi nemi	Vaisala-HMT 330	± %1 RH
Test hücresi sıcaklığı	Vaisala-HMT 330	± 0,2 °C
Enjeksiyon zamanı	Angle encoder	± 0,1 °KA
Silindir içi basınç	AVL Xion	0,05 °KA
Superchaeger-Boost hava sıcaklığı	AVL 515X	± 5 °C
Superchaeger-Boost hava basıncı	AVL 515X	± 10 mbar
Motor soğutma sıvısı ve yağ şartlandırıcısı	AVL 577	± 1 K
Yakıt tüketimi	AVL 735	< %0,15
Sıcaklık sensörü	PT100 (K tipi)	≤ ± %1

2.4.1. Deney motoru

Deneylerde 1,16 litre hacminde ve 16,4/1 sıkıştırma oranına sahip, tek silindirli, direkt püskürtmeli, su soğutmalı ve 50 kW gücünde bir dizel motor kullanılmıştır. Şekil 2.10.'da deney motoru ve dinamometre, Tablo 2.6'da ise deney motoruna ait teknik özellikler görülmektedir.

Tablo 2. 6. Deney motoruna ait özellikler

Motor tipi	4-zamanlı, tek silindirli
Silindir çapı x kurs boyu	106,5 x 127 mm
Motor hacmi	1120 cm^3
Sıkıştırma oranı	16,4:1
Maksimum güç	50 kW
Maksimum tork	160 Nm
Maksimum yüksüz devir	2500 d/d
Yakıt sistemi	Direkt püskürtmeli Common rail-1800 bar
Yakıt pompası	Bosch yüksek basınçlı mekanik pompa
Soğutma sistemi (motor soğutma sistemi ve yağlama sistemi için)	Şebeke suyu ile şartlandırılmış su soğutmalı
Emme ve egzoz supap sayısı	2-1



Şekil 2. 10. Deney motoru ve dinamometre

2.4.2. Egzoz gaz analizörü

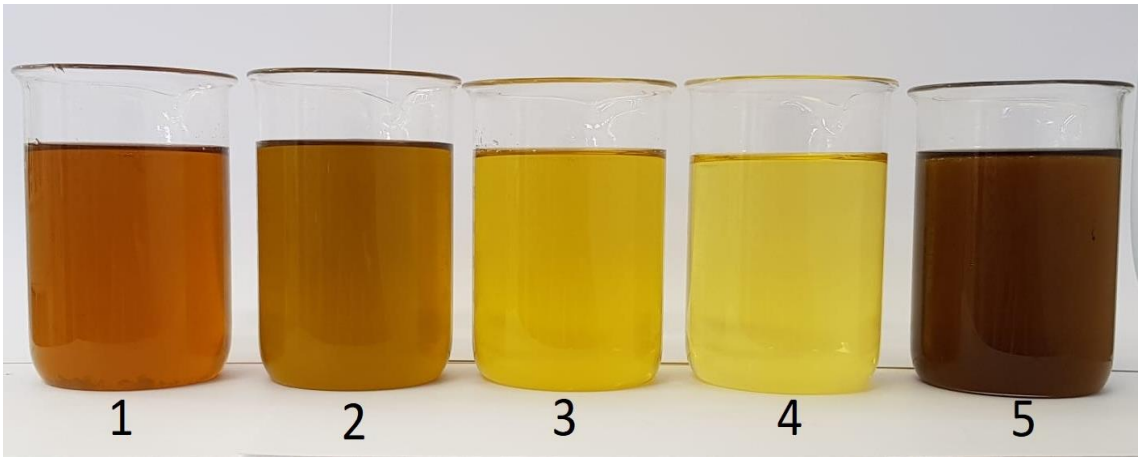
Motor deneyleri esnasında egzoz emisyonlarının ölçümü için Bosch BEA 460 egzoz emisyon ölçüm cihazı kullanılmıştır. Kullanılan cihaz ile NO, HC, CO, CO_2 ve is emisyonları ölçülebilmektedir. Deneylere başlamadan önce emisyon cihazına yetkili servis tarafından bakım ve kalibrasyon işlemleri yapılmıştır. Testlerde emisyon ölçümleri 3'er defa yapılmış ve ortalaması alınarak gerekli tablolar oluşturulmuştur. Emisyon cihazına ait özellikler Tablo 2.7'de verilmiştir.

Tablo 2. 7. Emisyon cihazına ait teknik özellikler

Ölçüm parametreleri	**Ölçme aralığı**	**Hassasiyet**
Hidrokarbon (HC)	0-10000 ppm	1 ppm
Azot monoksit	0-5000 ppm	1 ppm
Hava fazlalık katsayısı	0,5-1,8	0,001
Karbondioksit (CO_2)	0-18	0,01 % hacimsel
Oksijen (O_2)	0-22 % hacimsel	0,01 % hacimsel
Karbon monoksit (CO)	0-10 hacimsel	0,001 hacimsel
Opasite derecesi	0-100 %	0,1 %
Absorbiyon katsayısı	0-10 m^{-1}	0,01 m^{-1}

2.5. Deney Yakıtları

Deneylerde yakıt olarak dizel, biyodizel ve dizel-biyodizel karışımları kullanılmıştır. Deneylerde kullanılan yakıtın ham yağdan biyodizel haline gelene kadar olan süreci Şekil 2.11'de verilmiştir.



Şekil 2. 11. Deneylerde kullanılan hammadde ve yakıtlar

Burada,

1: Atık zeytinden elde edilen zeytinyağı

2: Ön iyileştirme işlemi yapılmış yağ

3: Atık zeytinyağı metil esteri

4: Yıkama ve kurutma işlemi yapılmış biyodizel

5: Gliserin olarak isimlendirilmiştir.

Biyodizel hacimsel olarak %100, 80, 60, 40, 20 ve 0 oranında dizel yakıtı ile karıştırılmıştır. Hazırlanan karışım yakıtları, karışım içerisinde kullanılacak biyodizel yakıtının baş harfi ve yüzdesi ile isimlendirilmiştir. Örneğin; karışım içerisinde %80 oranında dizel ve %20 oranında biyodizel olan karışım, B20 olarak adlandırılmıştır. Buna göre deneylerde kullanılan karışım yakıtları; saf biyodizel (B100), B80, B60, B40, B20 ve saf dizel (B0) olmak üzere 6 çeşittir.

Elde edilen biyodizelin fiziksel ve kimyasal özellikleri Sinop Üniversitesi Bilimsel ve Teknolojik Araştırmalar Uygulama ve Araştırma Merkezi ile Tarım ve Orman Bakanlığı Karadeniz Tarımsal Araştırma Enstitüsü Müdürlüğü Enerji Tarımı laboratuvarlarında belirlenmiştir. Üretilen biyodizelin bazı fiziksel ve kimyasal özellikleri Tablo 2.8'de verilmiştir.

Tablo 2. 8. Deney yakıtının bazı fiziksel ve kimyasal özellikleri

Özellik	**Birim**	**EN 14214**	**Zeytinyağı biyodizeli**	**Dizel**
Yoğunluk (15 ^{o}C'de)	kg m^{-3}	860–900	879,6	826,60
Kinematik viskozite (40 ^{o}C'de)	mm^2 s^{-1}	3,5-5,0	4,85	3,21
Su içeriği	ppm	max. 500	431,30	0,006
İyot Sayısı	g I.100 g^{-1}	max. 120	81,47	-
Parlama noktası	^{o}C	min. 101	190	59,90
Setan sayısı	-	min. 51	57,90	55,30
Soğuk filtre tıkanma noktası	^{o}C	-	7,38	-18
Oksitlenme kararlığı (110 ^{o}C)	Saat	min. 6	8,97	-
Alt ısıl değer	kJ/kg	-	36168	42950
Ortalama molekül ağırlığı	g/mol	-	285	195

2.6. Deney Yöntemi

Testlere başlamadan önce egzoz emisyon cihazının kalibrasyonu yapılmıştır. Deney motorunda gerekli kontroller yapılmış ve testler motorun kararlı çalışmaya başlamasından sonra gerçekleştirilmiştir. Deneyler soğutma suyu sıcaklığı 70 ^{o}C yağlama yağı sıcaklığı ise 90 ^{o}C olarak sabit tutulmuştur. Test yakıtlarının değişimi sırasında motor içinde kalan yakıt sistem tarafından otomatik olarak tahliye edilmiştir. Ayrıca, yeni bir yakıt testine başlamadan önce motor 10 dakika boşta çalıştırılmıştır.

2.6.1. Kullanılan çalışma parametreleri

Deneylerde çalışma parametresi olarak püskürtme basıncı, püskürtme avansı ve yakıt karışımları kullanılmıştır.

2.6.2. Ayarlama karakteristikleri

Deney motorunun püskürtme avansı ve basıncı değiştirilerek 1500 d/d sabit motor hızında ve dört farklı motor yükünde (%25, %50, %75 ve %100) motor performansı, egzoz emisyon ve yanma karakteristiklerindeki değişimler incelenmiştir.

2.6.2.1. Püskürtme avansı

Dizel motorlarda yakıtın püskürtülmesi ile yanmanın başlaması arasında geçen süre tutuşma gecikmesi (TG) olarak adlandırılmaktadır. Bu süre genellikle 6-8 KA arasında olmaktadır. TG'yi telafi etmek amacıyla orijinal püskürtme avansı değerine göre yakıtın daha önce enjekte edilmesi püskürtme avansı olarak tanımlanır. Püskürtme avansı motor performansı, egzoz emisyonları ve yanmayı doğrudan etkilemektedir. Bu yüzden farklı motor hızlarında ve yüklerinde uygun değerlerde olması yanma verimi açısından oldukça önemlidir. Bu çalışmada deneyler motorun orijinal püskürtme avansı dahil olmak üzere dört farklı püskürtme avansında gerçekleştirilmiştir. Avans değeri olarak motorun standart değerleri, -2 ^{o}KA, +2 ^{o}KA ve +4 ^{o}KA değerleri seçilmiştir. Deney motorunun her bir yükteki püskürtme avansı ve değerleri Tablo 2.9'da verilmiştir.

Tablo 2. 9. Deney motorunun farklı yüklerdeki püskürtme avansı değerleri

Motor yükü	-2 ºKA	STD püskürtme avansı	+2 ºKA	+4 ºKA
%25	13 ºKA	15 ºKA	17 ºKA	19 ºKA
%50	14 ºKA	16 ºKA	18 ºKA	20 ºKA
%75	15 ºKA	17 ºKA	19 ºKA	21 ºKA
%100	16 ºKA	18 ºKA	20 ºKA	22 ºKA

Püskürtme avansı ve basıncı, yazımları AVL firması tarafında üretilen ve test motoruna entegre edilen bir EKÜ ile belirlenmektedir. Deney motorunun her bir yükte ve püskürtme avansında ürettiği motor gücü değerleri Tablo 2.10'da verilmiştir.

Tablo 2. 10. Motor gücünün püskürtme avansına göre farklı yüklerdeki değişimi

Motor yükü	Püskürtme avansı (ºKA)	Motor gücü (kW)					
		BO	B20	B40	B60	B80	B100
%25	-2	4,31	4,07	4,37	4,16	3,90	3,83
	STD	4,28	4,22	4,33	4,15	4,06	4,03
	+2	4,33	4,06	4,33	3,98	3,84	3,83
	+4	4,38	4,03	4,35	4,09	3,89	3,83
%50	-2	6,70	6,05	6,60	6,24	6,31	5,77
	STD	6,61	6,22	6,58	6,36	6,12	5,70
	2	6,73	6,02	6,57	6,10	6,03	5,62
	+4	6,75	5,94	6,63	6,19	6,23	5,83
%75	-2	11,42	10,34	10,96	10,61	10,15	9,63
	STD	11,44	10,67	11,00	10,80	10,42	9,91
	+2	11,42	10,46	10,90	10,66	10,33	9,95
	+4	11,55	10,78	10,88	10,77	10,47	10,22
%100	-2	16,28	14,48	15,36	14,91	14,80	13,47
	STD	16,30	14,63	15,37	14,78	14,68	14,40
	+2	16,36	14,62	15,18	14,68	14,74	14,17
	+4	16,37	14,18	15,33	14,70	14,72	14,42

2.6.2.2. Püskürtme basıncı

Enjeksiyon basıncı, yakıtın atomizasyonuna ve buharlaşmasına etki eden faktörlerden birisidir. Enjeksiyon basıncının azaltılması yakıtın parçalanmasını kötüleştirecek ve buharlaşmayı yavaşlatacaktır. Bu çalışmada, motorun orijinal püskürtme basıncı dahil olmak üzere deneyler dört farklı püskürtme basıncında gerçekleştirilmiştir. Püskürtme basınçları, referans püskürtme basıncının haricinde +100 bar, +200 bar ve – 100 bar püskürtme basıncı olarak belirlenmiştir. Deney motorunun her bir yükteki püskürtme basıncı ve değerleri Tablo 2.11'de verilmiştir.

Tablo 2. 11. Deney motorunun farklı yüklerdeki püskürtme basıncı değerleri

Motor yükü	-100 bar	STD püskürtme basıncı	+100 bar	+200 bar
%25	650 bar	750 bar	850 bar	950 bar
%50	800 bar	900 bar	1000 bar	1100 bar
%75	1200 bar	1300 bar	1400 bar	1500 bar
%100	1500 bar	1600 bar	1700 bar	1800 bar

Deney motorunun her bir yükte ve püskürtme basıncında ürettiği motor gücü değerleri Tablo 2.12'de verilmiştir.

Tablo 2. 12. Motor gücünün püskürtme basıncına göre farklı yüklerdeki değişimi

Motor yükü	Püskürtme basıncı (bar)	Motor gücü (kW)					
		BO	B20	B40	B60	B80	B100
%25	-100	4,40	3,95	4,35	4,17	3,97	3,69
	STD	4,28	4,22	4,33	4,15	4,07	3,56
	+100	4,40	3,97	4,33	3,94	4,03	3,80
	+200	4,29	3,88	4,35	3,99	4,03	3,83
%50	-100	6,63	5,97	6,49	6,31	5,94	5,68
	STD	6,61	6,22	6,52	6,36	6,12	5,70
	+100	6,63	6,32	6,54	6,40	6,16	5,75
	+200	6,64	6,36	6,56	6,43	6,21	5,99
%75	-100	10,96	10,19	10,76	10,73	10,17	9,81
	STD	11,44	10,67	11,00	10,80	10,42	9,91
	+100	11,46	10,69	11,27	10,87	10,52	10,41
	+200	11,47	10,74	11,39	10,94	10,71	10,49
%100	-100	15,66	14,17	15,27	14,64	14,22	14,03
	STD	16,30	14,63	15,37	14,78	14,68	14,40
	+100	16,31	14,61	15,37	14,85	14,77	14,63
	+200	16,53	14,65	15,49	14,98	14,86	14,76

2.6.3. Yük karakteristikleri

Her bir test yakıtının farklı püskürtme avans ve basınçlarındaki yüke bağlı değişimler incelenmiştir. %25, 50, 75 ve 100 olmak üzere dört farklı yükte (pedal açıklığında) elde edilen sonuçlar ile performans, emisyon ve yanma değişimleri tespit edilmiştir.

2.7. Deney Verilerinin Analizinde Kullanılan Hesaplama Yöntemleri

Motor deneylerinden elde edilen veriler ile performans ve yanma analizlerinin kapsamlı bir şekilde incelenebilmesi için aşağıda sunulan hesaplamalar kullanılmıştır. Efektif güç Eş.(*2.2.b*) formülü ile hesaplanabilmektedir. Bu çalışmada kullanılan test sisteminin tamamen bilgisayar kontrollü olmasından dolayı bu veriler sistem tarafından otomatik hesaplanmıştır.

Açısal hız ile momentin çarpımı ise efektif gücü vermektedir.

$$N_e = \omega \cdot M_{\,e} = \frac{2 \cdot \pi \cdot n}{60} \cdot M_e \cdot \frac{1}{1000}\,(kW) \qquad (2.2a)$$

Efektif güç formülün sadeleştirilmiş hali Eş.(2.2b)'de verilmiştir [84–86].

$$N_e = \frac{M_e \cdot n}{9549{,}3} \qquad (2.2b)$$

2.7.1. Özgül yakıt tüketimi (ÖYT)

Birim zamanda tüketilen yakıt miktarı Eş.(2.3) ile hesaplanabilmektedir.

$$\dot{m}_y = \frac{m_{yakıt} \cdot 10^{-3} \cdot 3600}{\Delta t} \qquad (kg/h) \qquad (2.3)$$

Burada, $\dot{m}_y$: kütlesel yakıt debisi (kg/h), $m_{yakıt}$: tüketilen yakıt kütlesi (kg) ve Δt: 10 g yakıtı tüketme süresini (s) ifade etmektedir. Eş.(2.3)'de belirtilen $\dot{m}_y$ değeri aşağıdaki formülde yerine yazılarak ÖYT elde edilmiştir [84–88].

$$\text{ÖYT} = \frac{\dot{m}_y}{N_e} \cdot 10^3 \quad (g/kWh) \qquad (2.4)$$

2.7.2. Efektif verim

Motor milinden alınan net işin, verilen toplam enerjiye oranına efektif verim denir. Efektif verimin hesaplanmasında aşağıdaki formül kullanılmıştır

$$EFV = \left(\frac{1}{\ddot{O}YT \cdot H_u} \cdot 1000 \cdot 3600\right) \cdot 100 \quad (\%) \tag{2.5}$$

Burada, H_u: Alt ısıl değer (kJ/kg),

EFV : Efektif verim (%) olarak belirtilmiştir.

2.7.3. Yanma Analizi

İçten yanmalı motorlarda yanma analizinin yapılabilmesi için, anlık basınç değeri ve silindir hacminin bilinmesi gerekmektedir. Basınç ve silindir hacmi verileri kullanılarak motorun her bir krank açısı değerindeki silindir gaz basıncı (SGB) ve ısı dağılımı eğrileri hesaplanabilmektedir.

2.7.3.1. Silindir gaz basıncının analizi

Yapılan deneysel çalışmalar 1500 d/d sabit motor hızında gerçekleştirilmiştir. Çevrimler arasındaki silindir basınç farklarını en aza indirmek amacıyla 50 çevrimin ortalaması alınmıştır. Bu çalışmada silindir içi basınç verileri AVL Xion yazlımı kullanılarak elde edilmiştir. Aynı zamanda, basınç sensöründen gelen gösterge basıncına $\left(P_{gös}\right)$, atmosfer basıncı (P_{atm}) eklenerek, mutlak (gerçek) basınç (P_{mut}) değeri bulunmuş ve hesaplamalarda bu değer dikkate alınmıştır:

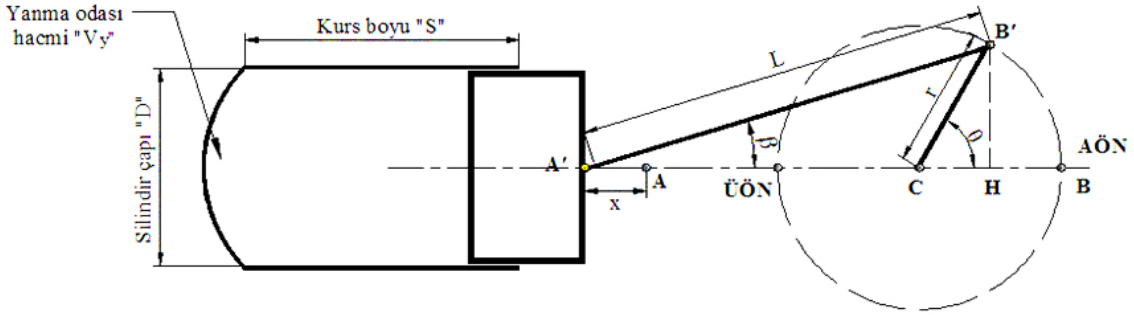
$$P_{mut} = P_{gös} + P_{atm} \tag{2.6}$$

Elde dilen basınç değerlerinde krank açısı cinsinden görülen farklılıkları minimuma indirmek için Eş. (2.7)'de verilen dijital low-pass filtre kullanılmıştır [89,90]:

$$dP = \frac{\begin{pmatrix} 2 \cdot (P_{\theta-4} + P_{\theta+4}) + 3 \cdot (P_{\theta-3} + P_{\theta+3}) + \\ 4 \cdot (P_{\theta-2} + P_{\theta+2}) + 5 \cdot (P_{\theta-1} + P_{\theta} + P_{\theta+1}) \end{pmatrix}}{33 \cdot d\theta} \tag{2.7}$$

2.7.3.2. Anlık silindir hacmi

Motor hacmindeki anlık değişimleri hesaplayabilmek için test motoruna ait krank-biyel mekanizmasının ölçülerinin bilinmesi gerekmektedir. Şekil 2.11'de gösterilen krank-biyel mekanizması üzerindeki geometrik ölçüler kullanılarak türetilmiş bağıntılar ile anlık silindir hacmi elde edilebilmektedir:



Şekil 2.11. Krank-biyel mekanizmasının şematik görünümü

Şekilde,

$\overline{A'B'} = \overline{AB} = L$: biyel kol uzunluğunu (m) ve $\overline{CB'} = \overline{CB} = r$: krank kolu yarıçapını (m) göstermektedir. Yanma odası hacmi "V_y" ise Eş.(2.7) ile hesaplanabilmektedir.

$$SO = \frac{V_y + V_s}{V_y} \rightarrow \; SO = 1 - \frac{V_s}{V_y} \rightarrow \; V_y = \frac{V_s}{SO - 1} \qquad (2.8)$$

Anlık silindir hacminin bulunabilmesi için, öncellikle pistonun silindir içerisinde aldığı anlık yolun bulunması gerekmektedir. Anlık yol $x(\theta)$, Şekil 2.11'de verilen krank-biyel mekanizmasından trigonometrik yöntemler kullanılarak çıkarılmaktadır. Buna göre,

$$x = \overline{A'B} - \overline{AB} \qquad (2.9a)$$

Şekil 2.11'e bakıldığında;

$$\overline{A'B} = \overline{A'H} + \overline{HB} \qquad (2.9b)$$

olduğu görülmektedir. Ayrıca, trigonometrik olarak $\overline{A'B'}$ uzunluğunun x eksenine izdüşümü $\overline{A'H}$;

$$\overline{A'H} = L \cdot cos\beta \qquad (2.9c)$$

ifadesi ile bulunur.

$$\overline{HB} = \overline{CB} - \overline{CH} \rightarrow \overline{HB} = r - r \cdot cos\theta \qquad (2.9d)$$

Eş. (2.16a)'da bulunan değerler yerine yazıldığında;

$$x = L \cdot cos\beta + r - r \cdot cos\theta - L \qquad (2.9e)$$

elde edilir. Formül düzenlendiğinde,

$$x = L \cdot (cos\beta - 1) + r \cdot (1 - cos\theta\ ) \qquad (2.9f)$$

Formülü KA (θ) cinsinden türete bilmek için krank ve biyel kollarının y-eksenine düşen iz düşümlerine bakıldığında,

$$L \cdot sin\beta = r \cdot sin\theta \qquad (2.10a)$$

eşit olduğu görülür. Buradan,

$$sin\beta = \frac{r}{L} \cdot sin\theta \qquad (2.10b)$$

elde edilir. Aynı zamanda trigonometrik bağıntıya göre,

$$sin^2\beta + cos^2\beta = 1 \qquad (2.11)$$

olduğu bilinir. Burada Eş. (2.10b)'den yararlanılarak, $cos\beta$ formülde çekilirse,

$$cos\beta = \sqrt{1 - \left(\frac{r}{L} \cdot sin\theta\right)^2} \qquad (2.12)$$

Eş. (2.11), Eş.(2.9f)'de yerine yazılıp gerekli düzenlemeler yapıldığında anlık yol formülü $x\ (\theta)$;

$$x\ (\theta) = (L - r) + r \cdot cos\theta - \sqrt{L^2 - r^2 \cdot sin^2\theta}\ '\ dir \qquad (2.13)$$

Anlık silindir toplam hacmi $V_T(\theta)$ (m^3) ise, yanma odası hacmi (V_y) ile anlık kurs hacminin "$V_s(\theta)$" toplamına eşittir. V_s ise anlık yolun "$x\ (\theta)$" silindir kesit alanı "A_s" (m^2) çarpımına eşittir.

$$V_T(\theta) = V_y + V_s(\theta) \qquad (2.14)$$

$$V_s(\theta) = x(\theta) \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4} \tag{2.15}$$

Eş. (2.13) ve Eş.(2.15), Eş.(2.21)'de yerine yazıldığında ve gerekli düzenlemeler yapıldığında,

$$V_T(\theta) = \left(\frac{1}{SO-1}\right) \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot x(\theta) \tag{2.16}$$

ifadesi ile pistonun silindir içerisinde süpürdüğü anlık hacim bulunabilmektedir [81].

2.7.3.3. Isı dağılım değişimleri

İçten yanmalı motorlarda ısı dağılımı termodinamiğin birinci kanunu kullanılarak elde edilebilir. Altı farklı yakıtın kullanıldığı bu çalışmada yanma sonu ortaya çıkan ısı dağılımı değişimleri tek boyutlu bir model kullanılarak elde edilmiştir. Buna göre, yanma odasındaki hava ve yakıt karışımının ideal gaz olduğu ve yanma odasındaki dolgunun miktarında bir değişim olmadığı kabul edilmektedir. Ayrıca, yanma odasındaki yakıtın yanması ile açığa çıkan enerji silindire sürülen enerji olarak kabul edilmiştir. Termodinamiğin I. Kanununa göre kapalı sistemler için enerji dönüşüm eşitliği Eş.(2.17) gibi yazılır ise [91,92],

$$\frac{du}{d\theta} = \mathrm{Qn} - \mathrm{W} - Q_{wall} \tag{2.17}$$

$$mC_v \frac{d\mathrm{T}}{d\theta} = Qn - P\frac{dV}{d\theta} \tag{2.18}$$

Burada;

du : İç enerji değişimini,

Qn : Yanma odasındaki net ısıyı (ısı dağılımı),

Q_{wall} : silindir duvarlarından kaynaklanan ısı kaybını,

W : Sistem sınırı tarafından oluşan sınır işini ifade eder.

$$PV = mRT \tag{2.19}$$

Eş.(2.19) için, kütle sabit kabul edilip, anlık sıcaklık değişimini bulabilmek için ideal gaz denklemine göre türev alındığında,

$$\frac{dT}{d\theta} = \frac{1}{mR}\left[P \cdot \frac{dV}{d\theta} + V \cdot \frac{dP}{d\theta}\right] \tag{2.20}$$

Eş. (2.20) bağıntısı elde edilir. Eş. (2.20) ve (2.18) kullanılarak beraber düzenlenir ise,

$$Qn = \left[\frac{C_v}{R} + 1\right] \cdot P \cdot \frac{dV}{d\theta} + \frac{C_v}{R} \cdot V \cdot \frac{dP}{d\theta} \tag{2.21}$$

ifadesi elde edilir. Burada, $\frac{C_v}{R}$, (k)özgül ısı oranı cinsinden Eş. (2.22)'de gösterildiği gibi yazılabilir.

$$\frac{C_v}{R} = \frac{1}{k-1} \tag{2.22}$$

Eş. (2.21), Eş. (2.22)'de yerine yazılıp formül düzenlendiğinde,

$$Qn = \left(\frac{k}{k-1}\right) \cdot P \cdot \frac{dV}{d\theta} + \left(\frac{1}{k-1}\right) \cdot V \cdot \frac{dP}{d\theta} + Q_{wall} \tag{2.23}$$

Eş. (2.23) ifadesi elde edilir. Eş. (2.23) ile silindir içerisindeki anlık ısı dağılımı hesaplanabilir. Burada,

Qn : Açığa çıkan ısı miktarı (J/ ^{o})

P : Silindir basıncı (Pa)

V : Silindir hacmi (m^3)

θ : Krank mili Açısını (^{o}KA) ifade etmektedir.

Silindir duvarlarından gerçekleşen ısı kaybı ise Eş. (2.24) ile hesaplanabilir. Burada,

$$Q_{wall} = h_g . S_w . (T - T_w) \tag{2.24}$$

h_g : Isı değişim katsayısı

S_w : Silindir duvar yüzeyi

T : Silindir gaz sıcaklığı

T_w : silindir duvar sıcaklığını ifade etmektedir.

Silindir duvarından gerçekleşen ısı kaynının hesaplanmasında duvar sıcaklığının sabit ve üniform olduğu kabul edilerek Eş. (2.25)'deki ısı transfer katsayısının tahmini için Eichelberg korelasyonu kullanılmıştır [93][94].

$$h_g = 10.2 S_w p^{0,5} T^{0,5} \tag{2.25}$$

2.7.4. Egzoz emisyonları analizi

Yapılan motor testlerinde hacimsel olarak ölçülen emisyon değerleri Eş. (2.26), Eş. (2.27) ve Eş. (2.28)'deki denklemler kullanılarak SAE J177'ye uygun olarak g/kWh'te dönüştürülmüştür [95].

$$CO_{2(g/kWh)} = \frac{0,0909 \,.\, CO_{2(ppm)} \,.\, EKAO}{N_e} \tag{2.26}$$

$$HC_{(g/kWh)} = \frac{0,05287 \,.\, HC_{(ppm)} \,.\, EKAO}{N_e} \tag{2.27}$$

$$NO_{(g/kWh)} = \frac{0,0952 \,.\, NO_{(ppm)} \,.\, EKAO}{N_e} \tag{2.28}$$

Burada;

EKAO: Egzoz kütle akış oranı (kg/dakika)

Ne : Efektif Gücü (kW) ifade etmektedir.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu bölümde biyodizel-dizel karışımlarının (B0, B20, B40, B60, B80 ve B100) motor performansı, egzoz emisyonları ve yanma analizleri üzerine etkisi araştırılmıştır. Deneyler 1,12 litre silindir hacmine sahip tek silindirli dizel bir motorda gerçekleştirilmiştir. Test şartları olarak ise dört farklı motor yükü (%25, %50, %75 ve %100) ve maksimum momentin elde edildiği 1500 d/d sabit motor hızı seçilmiştir. Motorun performans, yanma ve emisyon özelliklerine etkisini detaylı olarak inceleyebilmek için püskürtme basıncı ve avansı test parametresi olarak belirlenmiştir. Bunun için altı farklı deney yakıtı dört farklı püskürtme basıncı (-100, STD, +100 ve +200 bar) ve yine dört farklı püskürtme avansında (-2°, STD, +2° ve +4 ^{o}KA) test edilmiştir. Gerçekleştirilen deneyler sonucunda deney yakıtlarının püskürtme avansı ve basıncına göre değişimleri incelenmiştir. Ayrıca, saf biyodizel (B100) ve karışımlarının (B20, B40, B60 ve B80) performans, yanma ve emisyon sonuçları dizel (B0) ile kıyaslanmıştır. STD püskürtme avansı ve basıncında elde edilen değerler referans kabul edilmiştir.

3.1. Püskürtme Avansına Bağlı Değişimlerin Analizi

B0 (Dizel), B20, B40, B60, B80 ve B100 (biyodizel) yakıtları ile farklı test koşullarında elde edilen özgül yakıt tüketimi ve efektif verim değişimleri performans sonuçları olarak incelenmiş ve başlıklar altında sunulmuştur.

3.1.1. Motor performans sonuçlarının analizi

Motor performansının temel göstergelerinden olan motor gücü değişimi alternatif yakıtların etkisini gözlemlemede önemli bir faktördür. Püskürtme avansı ve basıncının motor gücü üzerindeki etkisi, bu tez çalışmasında araştırılmış ve sonuçlar aşağıdaki gibi detaylı olarak irdelenmiştir:

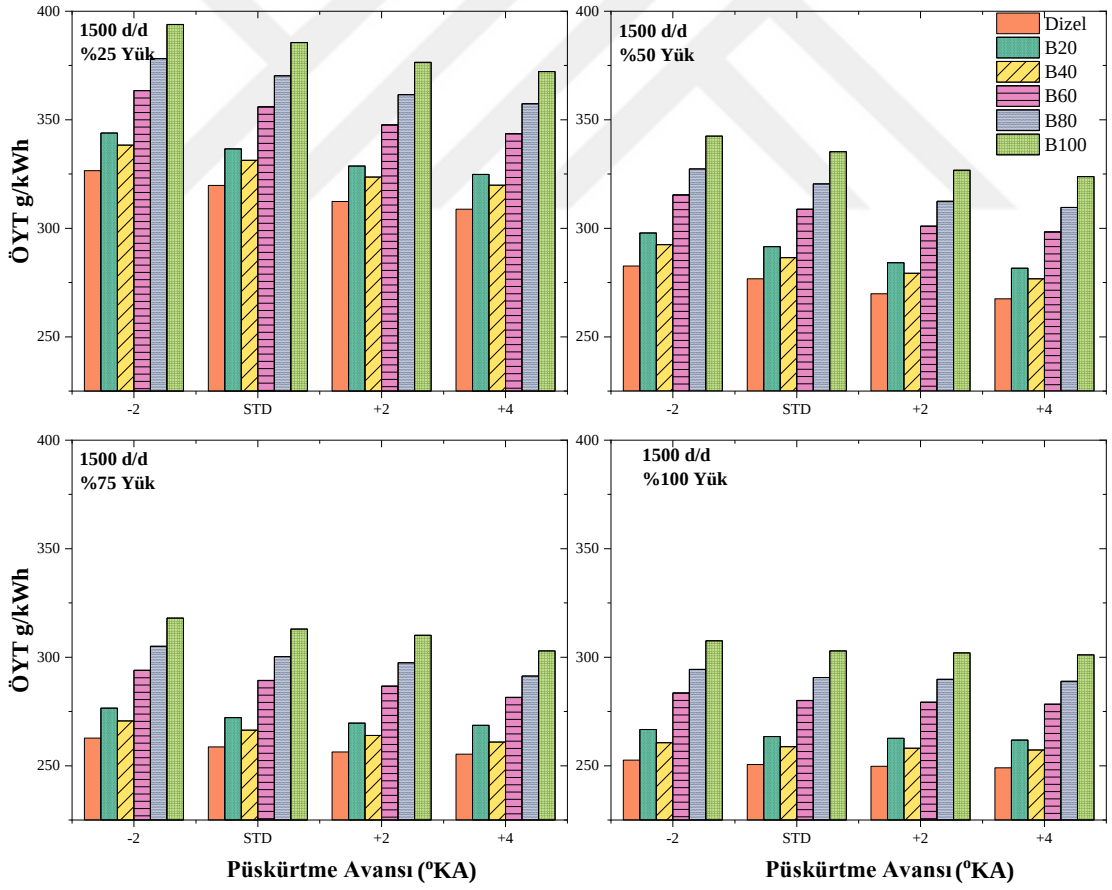
1500 d/d sabit motor hızında yapılan deneylerde yük olarak gaz pedalı pozisyonu alınmış ve tezin bütününde bu durum motor yükü olarak ifade edilmiştir. Test motoru, dizele göre optimize edilmiş olup yük ve motor hızına göre belirlenen püskürtme avansı ve püskürtme basıncı haritasına göre çalışmaktadır. Grafiklerde deney motorunun orijinal avans değeri, standart avans olarak ifade edilmiş ve STD olarak gösterilmiştir. Buna göre STD püskürtme avans değerleri %25 yükte 15 krank açısında (^{o}KA), %50 yükte 16 ^{o}KA,

%75 yükte 17 ^{o}KA ve %100 yükte 18 ^{o}KA'dır. Elektronik olarak kontrol edilebilen bu sistemde 1500 d/d sabit motor hızı için her bir yük değerindeki optimum avans değerine göre 2 ^{o}KA farkla iki kademe yukarı ve bir kademe aşağı olacak şekilde ayarlanmış ve deneyler gerçekleştirilmiştir.

Test sürecindeki püskürtme basıncı değerleri %25 yükte 750 bar, %50 yükte 900 bar, %75 yükte 1300 bar ve %100 yükte 1600 bar olarak belirlenmiştir. Bu değerler ECU tarafından motorun püskürtme basınç haritasına göre her bir motor yükü için sabit tutulmuştur.

3.1.1.1. Özgül yakıt tüketiminin (ÖYT) püskürtme avansına bağlı olarak değişimi

Birim zamanda tüketilen yakıt miktarının efektif güce oranına ÖYT denir. ÖYT'nin püskürtme avansına bağlı olarak değişimi Şekil 3.1'te görülmektedir.



Şekil 3. 1. ÖYT'nin püskürtme avansına göre değişimi

Motor yükünün artmasıyla birlikte ÖYT'nin azaldığı görülmektedir. Örnek olarak; STD püskürtme avansında B80 yakıtının %25, %50, %75 ve %100 yükteki ÖYT değerleri sırasıyla; 410,86, 315,69, 284,14 ve 272,63 g/kWh'dir. Motor yükünün artması birim zamanda tüketilen yakıt miktarını artırmaktadır. Bu sayede, ısı kayıpları azalmakta ve düşük yüklere göre silindir içi basınç değerleri daha yüksek seviyelere çıkmaktadır. Bunların sonucunda da motordan elde edilen güç artmaktadır. Fakat, püskürtülen yakıt miktarındaki artış motor gücündeki artış oranından az olduğu için ÖYT düşmektedir. Ayrıca, motor yükünün artmasıyla birlikte püskürtme basıncı da artmaktadır. Artan püskürtme basıncı yakıtın atomizasyonunu iyileştirmekte ve hava yakıt karşımı iyileşmektedir. Bu durum, yanmanın iyileşmesine, motor gücünün artmasına ve ÖYT'nin azalmasına yol açmaktadır.

Karışım içerisindeki biyodizel oranının artması ile genel olarak ÖYT'nin de arttığı görülmektedir. STD püskürtme avansı ve %50 motor yükü test şartlarında ÖYT değerleri 276,78 (B0), 291,56 (B20), 286,43 (B40), 308,78 (B60), 320,48 (B80) ve 335,29 (B100) g/kWh'dir. Motor gücündeki değişimlere paralel olarak biyodizelin ısıl değerinin dizelden düşük olmasının temel etken olduğu söylenebilir. Benzer şekilde, biyodizelin viskozite ve yoğunluğunun dizelden yüksek olması da bir başka sebep olarak gösterilebilir. ÖYT'nin püskürtme avansına bağlı olarak değişimlerinin incelendiği deneylerde; en düşük ÖYT değerlerinin B0 yakıtı ile en yüksek ÖYT değerlerinin ise B100 kullanımıyla elde edildiği görülmüştür. Yapılan bütün deneylerde biyodizel karışımları içerisinde en düşük ÖYT değerinin B40 yakıtıyla elde edildiği görülmüştür. Elde edilen sonuçlar literatürdeki birçok çalışma ile benzerlik göstermektedir [3,96–98].

Püskürtme avansının arttırılması ile genel bir yaklaşım olarak ÖYT azalmıştır. Örneğin, %75 motor yükünde ve püskürtme avansı +4 ^{o}KA olarak değiştirildiğinde ÖYT değerleri %1,29 (B0), %1,32 (B20), %2,07 (B40), %2,69 (B60), %2,97 (B80) ve %3,23 (B100) oranında azalmıştır. Püskürtme avansının arttırılması ile yakıt enjeksiyonu daha erken başlamakta ve yanma daha uzun bir periyotta gerçekleşmektedir. Bu sayede, ani basınç ve sıcaklık artışlarının engellendiği ve ısıl verimin attığı düşünülmektedir.

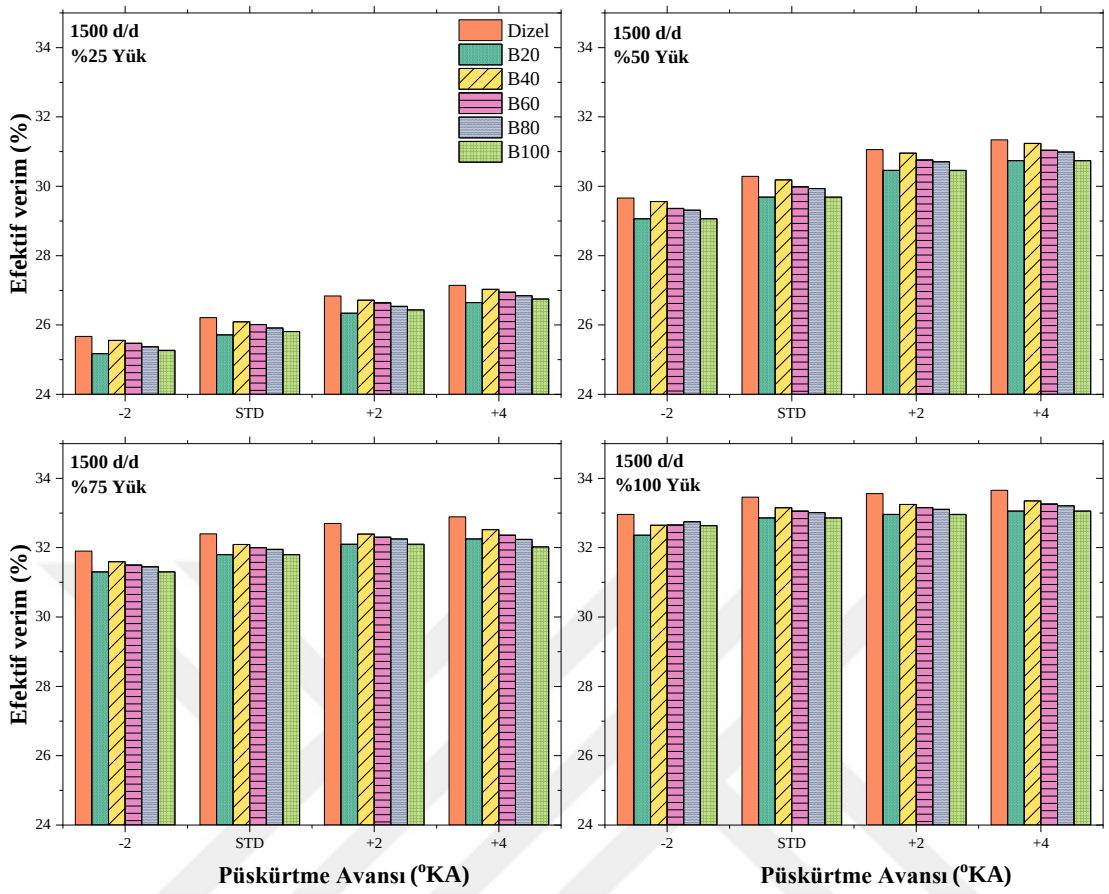
Püskürtme avansının azaltılması ile ÖYT'nin arttığı gözlemlenmiştir. Örneğin, %100 motor yükünde püskürtme avansı -2 ^{o}KA'na değiştirildiğinde ÖYT değerleri; 252,56 (B0), 266,64 (B20), 260,65 (B40), 283,54 (B60), 294,36 (B80) ve 307,61 (B100)

g/kWh'dir. Püskürtme avansı azaltıldığında, yakıt enjeksiyonu olması gerekenden daha geç başlamaktadır. Bu durumda, yakıtın tamamının yanması için zaman kalmamaktadır. Yanmanın bir bölümü genişleme zamanına sarkmaktadır. Sonuç olarak, hacim artmakta basınç ve sıcaklık azalmaktadır, yani yakıtın yanması için ideal şartlar oluşmamakta ve ÖYT artmaktadır. Bu durum, püskürtme avansının azaltılmasıyla elde edilen HC emisyonları ile uyum sağlamaktadır. Avansın azaltılması ile HC emisyonları artış göstermiş ve tam tam yanmanın gerçekleşmediği görülmüştür. Farklı püskürtme avansı değerlerinde biyodizel yakıt karışımları arasında en iyi ÖYT sonuçları B40 yakıtı ile elde edilmiştir. Yeni nesil dizel motorlarda hacimsel olarak %40'kadar biyodizel kullanımının mümkün olduğu düşünülmektedir.

3.1.1.2. Efektif verimin püskürtme avansına bağlı olarak değişimi

Motor milinden elde edilen işin motora verilen toplam enerjiye oranına efektif verim denilmektedir. İçten yanmalı motorlarda yanma sonucu elde edilen enerjinin tamamı yararlı ısı kayıpları nedeniyle faydalı işe dönüşememektedir[12]. Bu yüzden, efektif verim motor performansının değerlendirilmesi açısından oldukça önemli bir parametredir. Sabit devir, dört farklı yük ve altı farklı yakıt ile gerçekleştirilen deneylerde efektif verimin püskürtme avansına bağlı değişimi Şekil 3.2'de görülmektedir.

Motor yükünün artmasıyla birlikte tüm yakıtlar için efektif verim artış eğilimi göstermiştir. Örnek olarak, STD püskürtme avansında B0 yakıtının %25, %50, %75 ve %100 yükteki efektif verim değerleri sırasıyla; %26,21, %30,28, %32,40 ve %33,45'tir. Efektif verimdeki bu artış, motor yükünün artmasına bağlı olarak özgül yakıt tüketiminin azalmasından kaynaklanmaktadır.



Şekil 3. 2. Efektif verimin püskürtme avansına göre değişimi

Karışım içerisindeki biyodizel oranının artmasıyla efektif verimde nispeten bir azalma görülmüştür. Örneğin, STD püskürtme avansı ve %50 motor yükünde B0, B20, B40, B60, B80 ve B100 yakıtlarının efektif verim değerleri sırasıyla; %30,28, %29,68, %30,18, %29,98, %29,93 ve %29,68'dir. Bu azalma biyodizel oranının artmasına paralel olarak ÖYT'nin artması ve biyodizelin ısıl değerinin dizelden düşük olmasından kaynaklanmaktadır. Yakıtların efektif verimleri arasındaki fark sınırlı miktardadır. Kullanılan yakıt karışımlarının ısıl değerlerinin birbirine yakın olması, efektif verim değerlerindeki yakınlığının temel nedeni olarak gösterilebilir.

Püskürtme avansının STD değerinin üzerine çıkarılmasıyla genel olarak efektif verim de artış görülmüştür. Örneğin; %75 motor yükünde püskürtme avansı STD değerine göre +4 ^{o}KA arttırıldığında B0, B20, B40, B60 B80 ve B100 yakıtları için efektif verim değerleri sırasıyla; %1,50, %1,42, %1,32, %1,12, %0,89 ve %0,69 oranında artmıştır. Püskürtme avansının artırılmasıyla birlikte yakıt daha erken püskürtülmüş ve yanma için gerekli zaman artmıştır. Bu durumun, yanmayı iyileştirerek motor gücünü kısmen arttırdığı ve

ÖYT'yi düşürdüğü ifade edilebilir. Püskürtme avansının artırılması ile HC emisyonları azalmış ve CO_2 ise artış göstermiştir. Bu durum, artan püskürtme avansı ile yanmanın iyileştiğine örnek olarak gösterilebilir.

Genel olarak püskürtme avansının azaltılması ile efektif verimin azaldığı görülmüştür. Örnek olarak, %100 motor yükünde püskürtme avansının STD değerine göre -2 ^{o}KA azaltılmasıyla B0, B20, B40, B60 B80 ve B100 yakıtları için efektif verim değerleri sırasıyla; %1,49, %1,52, %1,50, %1,21, %0,77 ve %0,67 oranında azalmıştır. Bu azalma yakıtın ÜÖN'ye daha yakın bir yerde püskürtülmesi sonucu yakıtların yanma için yeterli zaman bulamamasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Avansın azaltılması ile motor gücü düştüğü, ÖYT'nin arttığı ve buna bağlı olarak da efektif verimin azaldığı söylenebilir.

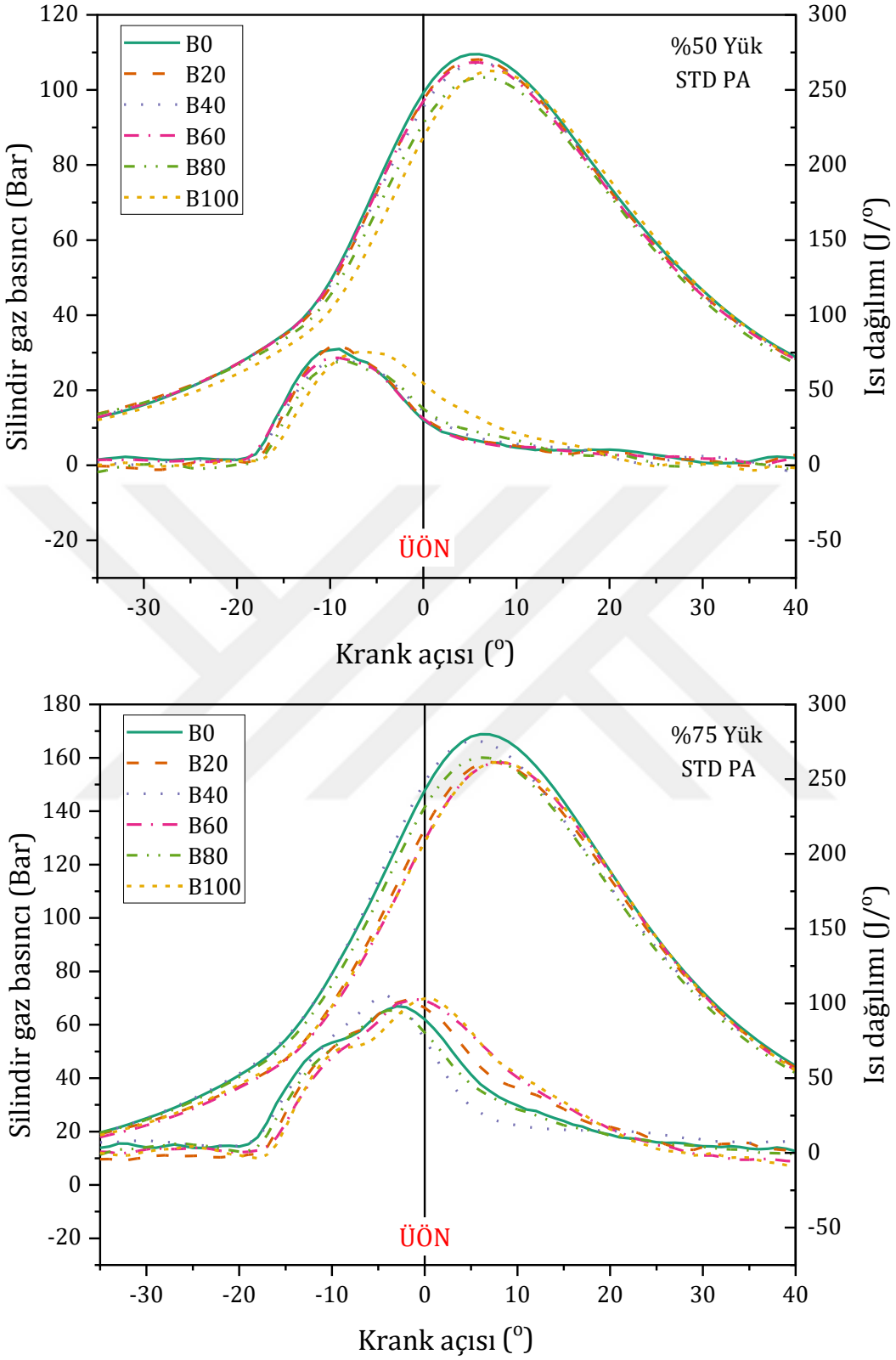
3.1.2. Yanma analizi

Teknolojinin gelişmesiyle birlikte yüksek basınçlı ve kademeli yakıt püskürtme sistemleri, dizel motorlarda daha iyi ve kararlı bir yanmayı mümkün kılmıştır. Yakıt enjeksiyon sistemlerindeki bu olumlu gelişmeler; motor performansı, emisyon ve gürültünün iyileşmesine olanak sağlamıştır. Eski nesil dizel motorlarda kullanılan düşük basınçlı ve tek kademeli püskürtme yapan yakıt sistemlerinde ani basınç artışları meydana gelmektedir. Bu durum, motorda titreşime ve gürültüye neden olmaktadır. Bunun yanı sıra, eski nesil klasik sistemlerde yakıt düşük basınçta püskürtülmektedir. Yakıt atomizasyonunu kötüleştiren bu durum, gücün düşmesine ve ÖYT'nin artmasına neden olmaktadır. Yeni nesil yüksek basınçlı enjeksiyon sistemlerinde ise yakıt çok yüksek basınçlarda püskürtülerek maksimum atomizasyon sağlanmaktadır. Bu çalışmada kullanılan motor direkt püskürtmeli ve maksimum 1800 bar basınçlı yakıt sistemine sahiptir. Ayrıca, deney motorunda ana püskürtmeden 4-8 ^{o}KA önce bir ön püskürtme yapılarak; yanmanın iyileşmesi, motor performansının arttırılması, egzoz emisyonlarının azaltılması, motor gürültü ve titreşiminin azaltılması hedeflenmiştir. Yanma analizlerinde çevrimden çevrime oluşabilecek farkları azaltmak için 50 çevrimin ortalaması alınmış ve grafikler halinde sunulmuştur.

3.1.2.1. Silindir gaz basınçları ve ısı dağılımlarının püskürtme avansına bağlı değişimi

Silindir gaz basınçları ve ısı dağılımlarının %50 ve %75 motor yükünde ve STD PA'daki değişimleri Şekil 3.3'te görülmektedir. Silindir gaz basınç eğrileri incelendiğinde, tüm yakıtların kontrollü yanma safhasının düzenli bir şekilde oluştuğu görülmektedir. %50 ve %75 motor yüklerinde yapılan testlerde maksimum silindir gaz basınç değerlerinin 3 ile 9 ^{o}KA arasında gerçekleştiği tespit edilmiştir. Karışım içerisindeki biyodizel oranının artmasıyla silindir gaz basınçlarının nispeten azaldığı görülmüştür. Örnek olarak, STD püskürtme avansı ve %50 motor yükünde B0, B20, B40, B60, B80 ve B100 yakıtlarının maksimum silindir gaz basınç değerleri ve konumları sırasıyla; 109,52 (6 ^{o}KA), 108,11 bar (6 ^{o}KA), 107,26 bar (5 ^{o}KA), 107,34 bar (6 ^{o}KA), 103,36 (6 ^{o}KA) ve 105,04 bar (7 ^{o}KA)'dır. Biyodizel ve karışım yakıtların ısı dağılım eğrileri incelendiğinde, ısı açığa çıkışlarının krank açısı cinsinden dizele kıyasla daha ileri bir noktada başladığı ve değerinin ise daha yüksek seviyede olduğu gözlemlenmiştir. Örneğin, STD püskürtme avansı ve %75 motor yükünde B0, B20, B40, B60, B80 ve B100 yakıtlarının ısı dağılımları sırasıyla; 99,80 J/^{o}KA, 102,21 J/^{o}KA, 105,03 J/^{o}KA, 101,43 J/^{o}KA, 95,32 J/^{o}KA ve 102,84 J/^{o}KA olarak hesaplanmıştır.

Biyodizelin viskozitesinin yüksek olması atomizasyonun ve hava/yakıt karışımının kötüleşmesine yol açmaktadır. Ayrıca, yakıtın ısıl değeri dizele kıyasla düşük seviyededir. Bu özelliklerin etkisiyle birlikte yanma periyodu genişlemekte, basınç ve ısı dağılım değerleri azalmakta ve maksimum silindir gaz basıncı ÜÖN'den uzaklaşmaktadır [99].



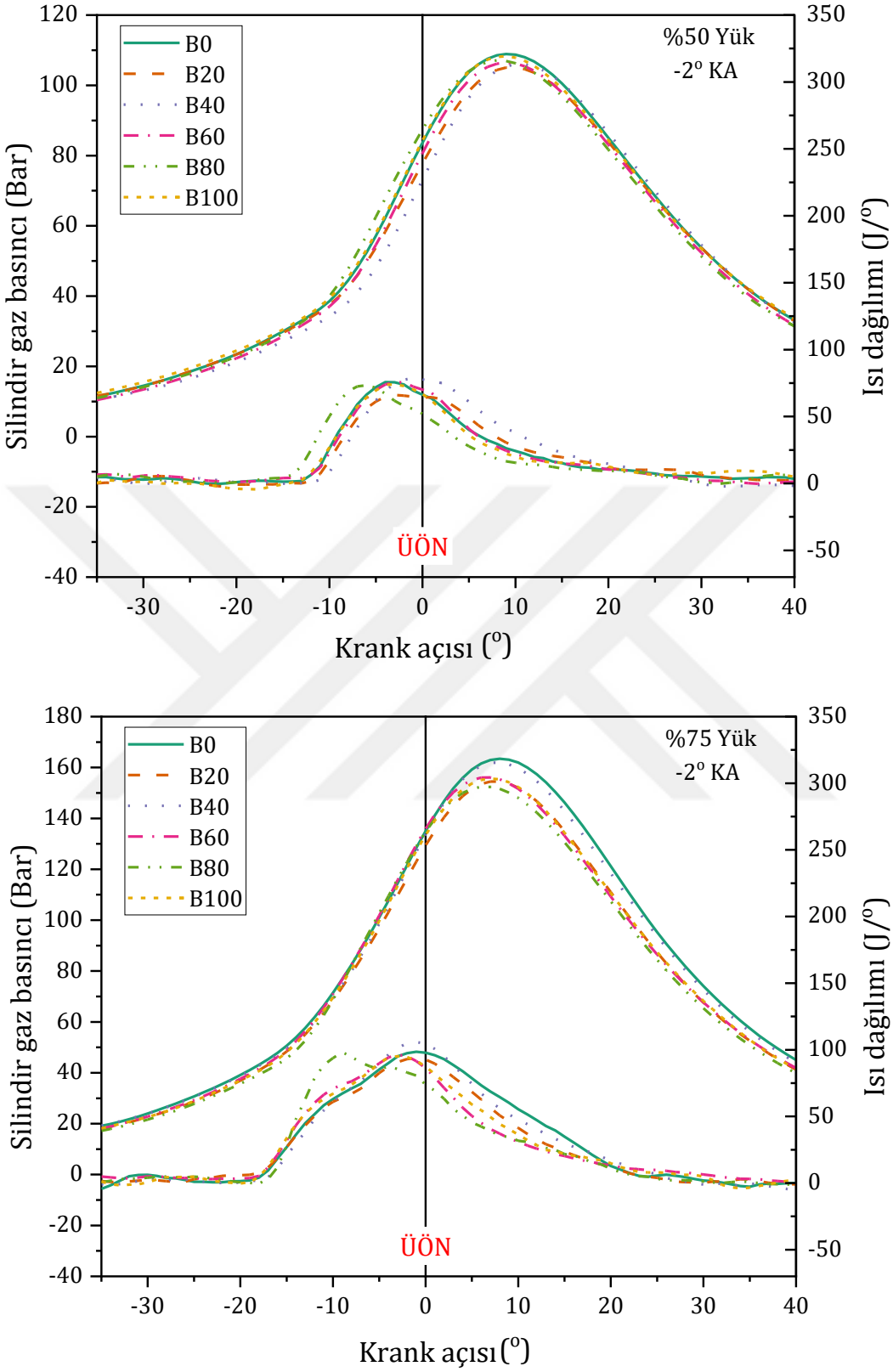
Şekil 3. 3. Silindir gaz basınçları ve ısı dağılımlarının STD PA'daki değişimleri

Karışım yakıtları içerisinde biyodizel oranı arttıkça silindir gaz basıncının ve ısı dağılımının B0'a göre genel olarak azalmasında bu yakıt özellikleri etkili olduğu düşünülmektedir, Şekil 3.3.

STD PA çalışma şartlarında, motor yükünün artmasıyla birlikte tüm test yakıtlarından elde edilen silindir gaz basıncı ve ısı dağılım değerlerinin yükseldiği tespit edilmiştir. Artan motor yükü ile silindir içine gönderilen yakıt miktarı çoğalmakta ve yanma sonu sıcaklıklar yükselmektedir. Motorun çalışması sırasında takip eden diğer çevrimlerde yanma oluşumu için elverişli bir ortam oluşturmaktadır. Bu durum, artan yük ile STD avans değerinde ısı dağılım değerlerini ve silindir içi basıncı genel olarak artırmaktadır.

Deney motorunda STD püskürtme avansının -2 ^{o}KA azaltılmasının silindir gaz basıncı ve ısı dağılımları üzerine etkisi Şekil 3.4'te verilmiştir. Püskürtme avansının azaltılması ile maksimum silindir gaz basınçlarında bir miktar azalma görülmüştür. Örnek olarak, %50 motor yükünde ve püskürtme avansının -2 ^{o}KA'ya değiştirilmesiyle B0, B20, B40, B60 B80 ve B100 yakıtlarının maksimum silindir gaz basınçları ve konumları sırasıyla; 108,92 (9 ^{o}KA)105,40 bar (10 ^{o}KA), 105,97 bar (10 ^{o}KA), 106,47 bar (9 ^{o}KA), 107,08 (8 ^{o}KA) ve 108,26 bar (9 ^{o}KA)'dır. Avansının azaltılmasıyla yakıtların silindir gaz basınçlarında değişimin sınırlı kaldığı, fakat maksimum silindir gaz basınçlarının oluştuğu noktanın ÜÖN'den uzaklaştığı görülmüştür. Bu durum, püskürtmenin ÜÖN'ya daha yakın bir noktada yapılmasından dolayı yanmanın geç başlamasından kaynaklanmaktadır.

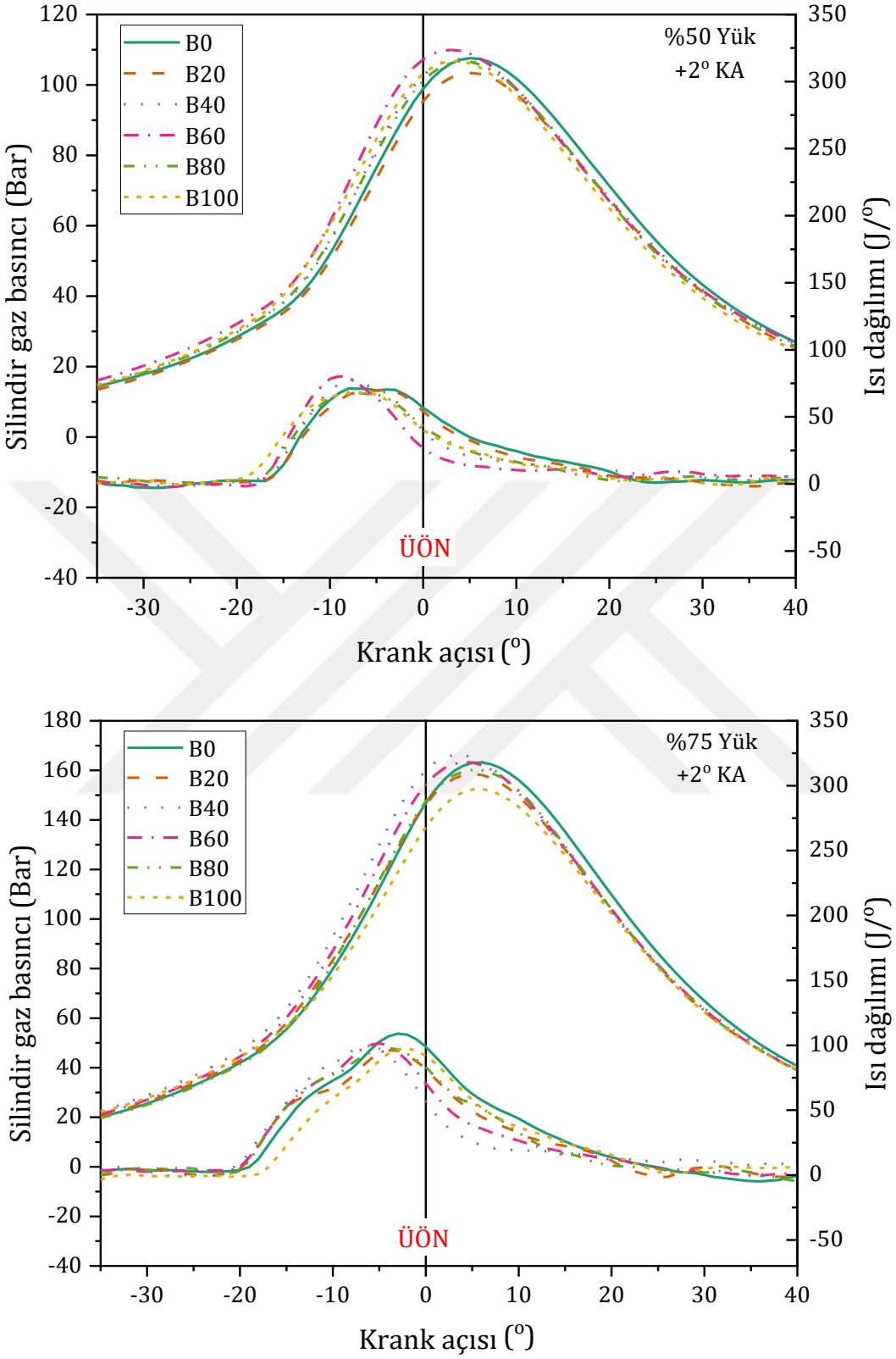
% 75 motor yükünde püskürtme avansı -2 ^{o}KA olarak değiştirildiğinde B0, B20, B40, B60 B80 ve B100 yakıtlarının maksimum ısı dağılımları sırasıyla; 98,09 J/^{o}KA, 102,21 J/^{o}KA, 105,03 J/^{o}KA, 102,71 J/^{o}KA, 95,32 J/^{o}KA ve 103,30 J/^{o}KA olarak hesaplanmıştır. Püskürtme avansının azaltılması, dizelin ısı dağılımın değerlerinde bir düşüşe yol açarken biyodizel karışımların da artışa neden olmuştur. Bu durum, biyodizelin tutuşma gecikmesi süresinin dizelden az olması ile ilgilidir. Ayrıca, biyodizel ve karışımlarının ısı dağılım eğrilerinin tepe noktaları dizele kıyasla daha geniştir. Bu durum, biyodizel kullanımıyla ÖYT'nin artması ve biyodizelin buharlaşma eğrisinin dizele göre daha yatay olması ile ilişkilendirilebilir [12].



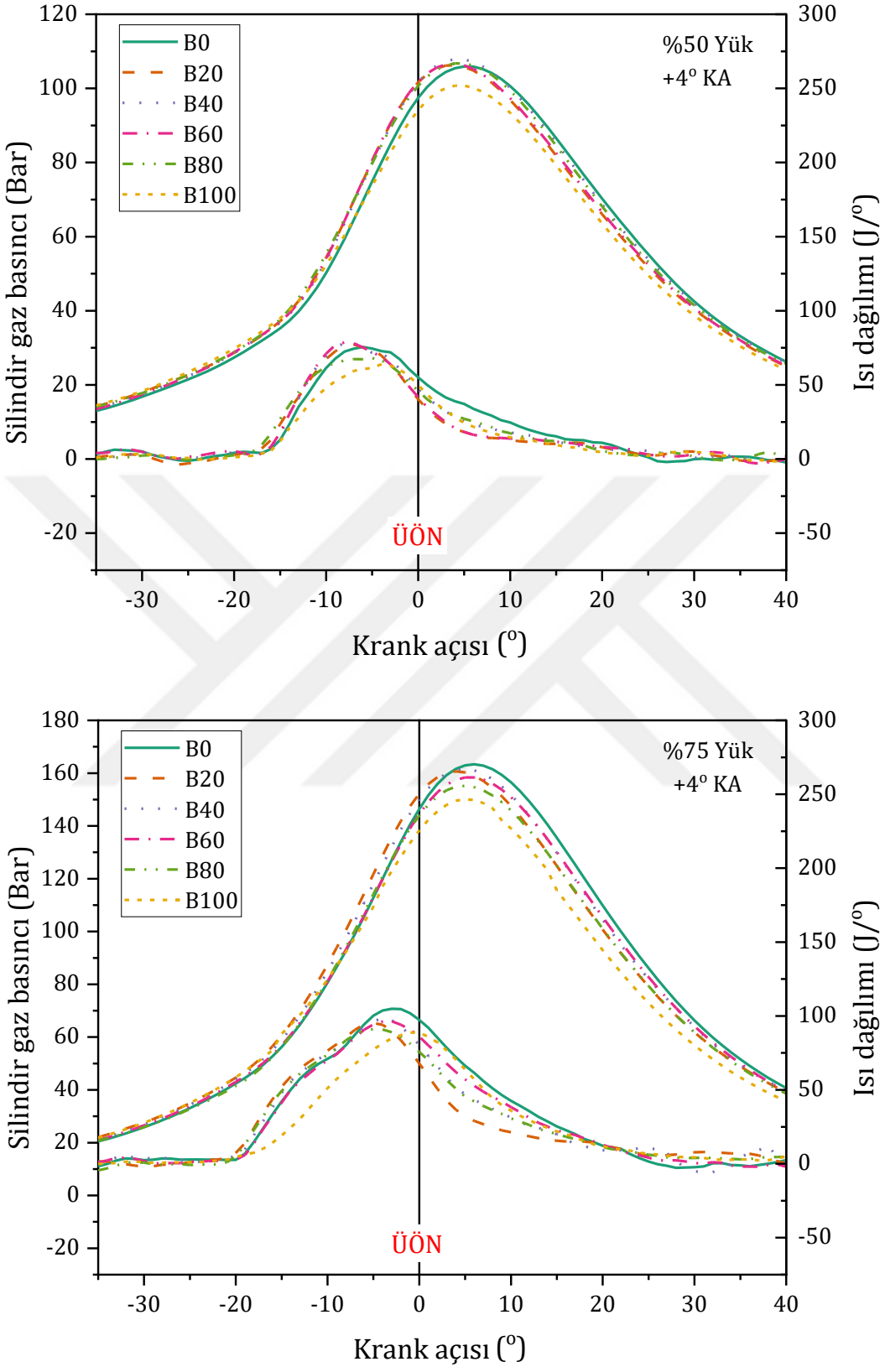
Şekil 3. 4. Silindir gaz basınçları ve ısı dağılımlarının -2 °KA'daki değişimleri

PA avansının azaltılması şartlarında, Motor yükünün artması ile maksimum silindir gaz basınçları artmış ve konumları ÜÖN'ye yaklaşmıştır. Örneğin, %75 motor yükü ve -2 ^{o}KA püskürtme avansında B0, B20, B40, B60, B80 ve B100 yakıtlarının maksimum silindir gaz basınç değerleri sırasıyla; %33,35, %31,77, %34,55, %31,79, %29,72 ve %30,41 oranında artmıştır. Benzer olarak artan yük ile birlikte açığa çıkan ısı oranı yükselişe geçmiştir. Örnek olarak, -2 ^{o}KA püskürtme avansında motor yükünün %75'e çıkarılmasıyla B0, B20, B40, B60, B80 ve B100 yakıtlarının açığa çıkan ısı oranı sırasıyla; %26,11, %16,37, %28,45, %25,72, %24,65 ve %14,97 oranında artmıştır.

Şekil 3.5 ve 3.6'da silindir gaz basınçları ve ısı dağılımlarının +2 ve +4 ^{o}KA'daki değişimleri görülmektedir. Püskürtme avansının artırılması ile genel olarak maksimum silindir gaz basınç değerleri yükselmiş ve maksimum basıncın oluşma noktası ÜÖN'ye yaklaşmıştır. Örnek olarak, %50 motor yükünde ve püskürtme avansı +2 ^{o}KA olarak değiştirildiğinde, B0, B20, B40, B60, B80 ve B100 yakıtlarının maksimum silindir gaz basınç değerleri ve konumları sırasıyla; 107,59 bar (5 ^{o}KA), 105,56 bar (5 ^{o}KA), 107,13 bar (3 ^{o}KA), 109,953 bar (3 ^{o}KA), 106,55 bar (5 ^{o}KA) ve 106,70 bar (4 ^{o}KA)'dır. Püskürtmenin STD PA'ya göre öne alınması ile yanma daha erken başlamış ve yanma süresi uzamıştır. Bu sayede, maksimum silindir gaz basınçları artmıştır. Avansın artırılmasıyla biyodizel karışımlarının maksimum silindir gaz basıncı konumunun ÜÖN'ye daha fazla yakınlaştığı görülmektedir. Biyodizelin oksijen içeriği tutuşma gecikmesini kısaltacağından, yakıtın dizele kıyasla daha erken yanmaya başlaması bu duruma sebep olarak gösterilebilir. Bazı araştırmacılar biyodizelin viskozitesinin yüksek olmasından dolayı püskürtme periyodunu hızlandırdığını ve bunun sonucunda püskürtme başlangıcının dizele göre daha erken başladığını belirtmektedir [100]. Ancak, deney sisteminde elektronik kontrollü yakıt enjektörleri kullanılmasının yüksek viskozitenin yol açabileceği erken püskürtme etkisini sınırlayacağı düşünülmektedir. Biyodizel ve karışımlarının kullanımı ile maksimum silindir basıncının dizele göre daha geniş aralıkta oluştuğu görülmüştür. Bu durum, dizelin kaynama noktasının biyodizelden düşük olması ve biyodizelin buharlaşma eğrisinin dizele göre daha yatay olmasından kaynaklanmaktadır [12].



Şekil 3. 5. Silindir gaz basınçları ve ısı dağılımlarının +2 °KA'daki değişimleri



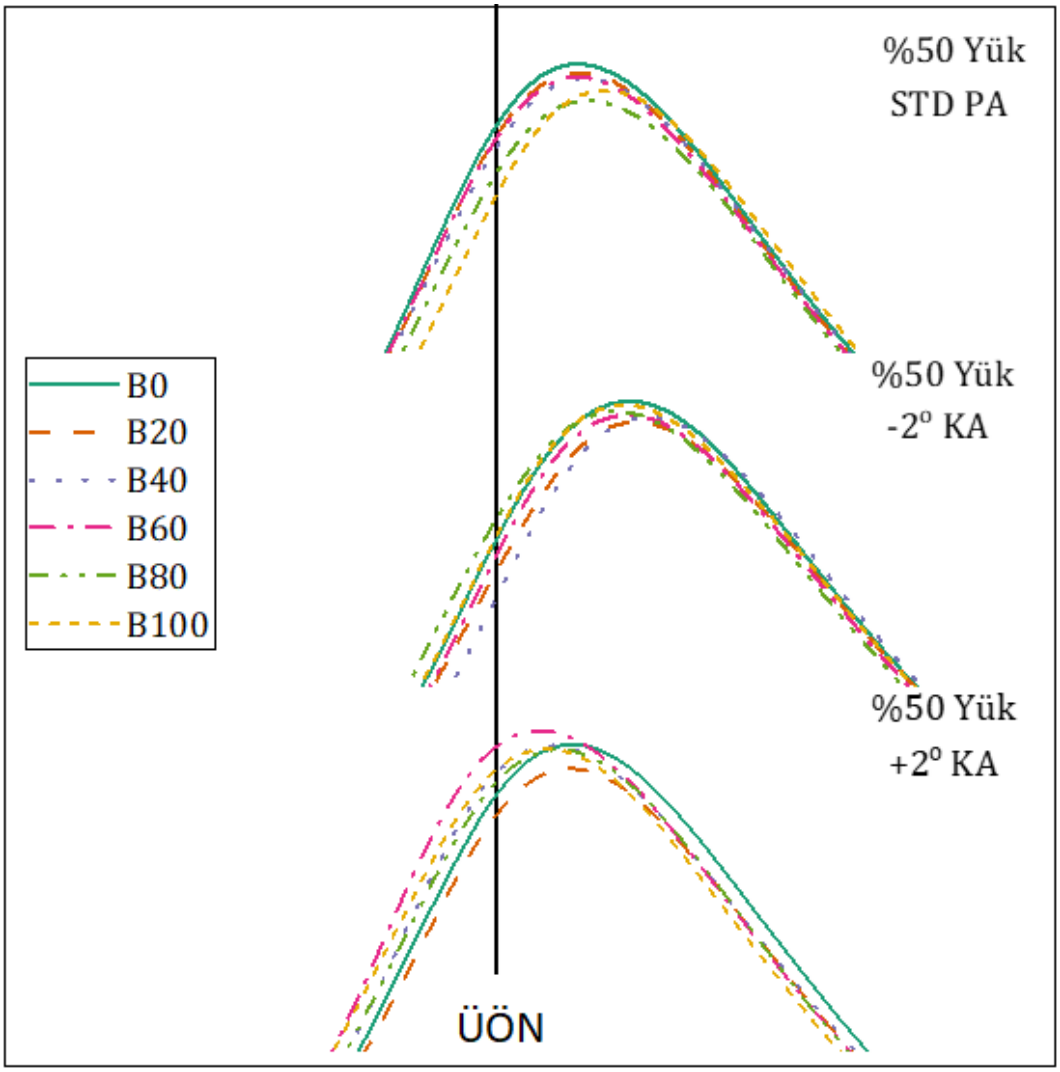
Şekil 3. 6. Silindir gaz basınçları ve ısı dağılımlarının +4 °KA'daki değişimleri

%75 motor yükünde ve püskürtme avansının +2 ^{o}KA'ya değiştirilmesiyle oluşan maksimum ısı dağılımları B0 için 109,03 J/^{o}KA, B20 için 96,11 J/^{o}KA, B40 için 99,65 J/^{o}KA, B60 için 101,67 J/^{o}KA, B80 için 97,71 J/^{o}KA ve B100 için 97,54 J/^{o}KA olarak hesaplanmıştır. Avansın artırılmasıyla B100 hariç tüm yakıtların ısı açığa çıkışı dizelden önce gerçekleşmiştir. Bu durum, yakıtların uçuculuğu ile ilişkilendirilebilir. Uçuculuğu yüksek olan yakıtlar buharlaşma evresinde yanma odasından daha fazla ısı çektikleri için tutuşma başlangıcının gecikmesine neden olabilirler [5]. Dizelin uçuculuk değerinin biyodizelden yüksek olması, tutuşma başlangıcının gecikmesine yol açmaktadır. Bu durum, biyodizel karışımlarının ısı açığa çıkışının daha erken gerçekleşmesine sebep olmaktadır. Ayrıca, biyodizelin oksijen içeriği, tutuşma ve yanma safhalarını hızlandırmaktadır. Bu durum, biyodizelin ısı açığa çıkış başlangıcının dizelden daha önce gerçekleşmesinin bir başka sebebi olarak gösterilebilir [101]. Genel olarak test yakıtlarının açığa çıkan ısı oranı benzer çıkmıştır. Ancak, karışım içerisindeki biyodizel oranı yüksek olan B80 ve B100 yakıtlarının açığa çıkan ısı oranı dizelden düşüktür. Bu durum, biyodizelin alt ısıl değerinin düşük olmasıyla ilgilidir.

Püskürtme avansının artırılması şartlarında, motor yükünün artması ile maksimum silindir gaz basınçları artmış ve konumları ÜÖN'ye yaklaşmıştır. Örneğin, %75 motor yükünde ve püskürtme avansı +2 ^{o}KA olarak değiştirilmesiyle B0, B20, B40, B60, B80 ve B100 yakıtlarının maksimum silindir gaz basınç değerleri sırasıyla; %34,05, %33,42, %34,41, %33,83, %34,75 ve %30,01 oranında artmıştır. Motor yükünün artışı ile ısı dağılımları da yükselmiştir. Örnek olarak, +2 ^{o}KA püskürtme avansında motor yükünün %75'e çıkarılmasıyla B0, B20, B40, B60, B80 ve B100 yakıtlarının ısı dağılımları sırasıyla; %30,72, %19,62, %21,85, %23,35, %30,31 ve %34,45 oranında artmıştır.

Püskürtme avansının +4 ^{o}KA olarak değiştirilmesi ile maksimum silindir gaz basınçlarındaki değişimin +2 ^{o}KA'ya göre sınırlı kaldığı tespit edilmiştir. Dizel kullanımına kıyasla biyodizel ve karışım yakıtlarından elde edilen maksimum silindir gaz basınçlarının ÜÖN'ya daha yakın bir konumda oluştuğu görülmektedir, Şekil 3.6. %50 motor yükü ve +4 ^{o}KA püskürtme avansı ile yapılan deneylerde yakıtların maksimum ısı dağılımları B0 için 75,53 J/°KA, B20 için 77,25 J/°KA, B40 için 77,87 J/°KA, B60 için

77,93 J/°KA, B80 için 68,09 J/°KA ve B100 için 63,93 J/°KA olarak tespit edilmiştir. Silindir gaz basınçlarının püskürtme avansına göre konumları Şekil 3.7'de verilmiştir.



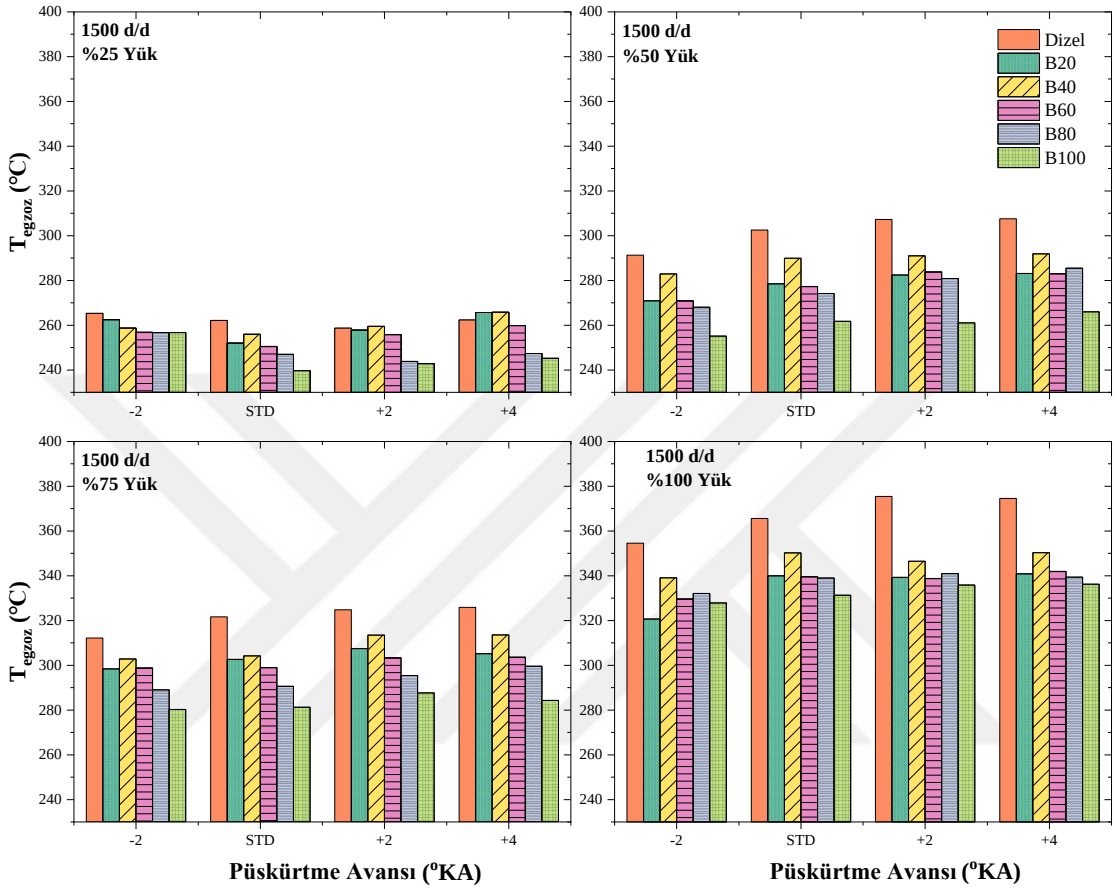
Şekil 3. 7. Silindir gaz basıncı konumunun püskürtme avansına göre değişimi

3.1.3. Egzoz emisyonu sonuçlarının analizi

3.1.3.1. Egzoz gaz sıcaklığının (EGS) püskürtme avansına bağlı olarak değişimi

EGS, egzoz emisyonları için belirleyici bir parametredir. EGS oluşumunu etkileyen en önemli değişkenler; kullanılan yakıtların fiziksel ve kimyasal özellikleri ile motorun işletme koşullarıdır. Şekil 3.8'de EGS'nin püskürtme avansına bağlı olarak değişimi görülmektedir. Yapılan deneylerde tüm yakıtlarda motor yükünün artmasıyla beraber egzoz manifold sıcaklıklarının da arttığı görülmüştür. Örnek olarak, STD püskürtme

avansında B40 yakıtının %25, %50, %75 ve %100 yükteki EGS değerleri sırasıyla; 255,95 ^{o}C, 289,52 ^{o}C, 304,18 ^{o}C ve 350 ^{o}C'dir. Egzoz manifold sıcaklığındaki bu artışın nedeni motor yükünün artması ile silindire püskürtülen yakıt miktarının artmasıdır.



Şekil 3. 8. EGS'nin püskürtme avansına bağlı olarak değişimi

Genel olarak karışım içerisindeki biyodizel oranının artması ile EGS değerlerinin azaldığı görülmektedir. STD püskürtme avansı ve %50 motor yükünde B0, B20, B40, B60, B80 ve B100 yakıtlarının EGS değerleri sırasıyla; 302,51 ^{o}C, 278,52 ^{o}C, 289,93 ^{o}C, 277,28 ^{o}C, 274,12 ^{o}C ve 261,21 ^{o}C olarak ölçülmüştür. Bu durumun sebepleri, biyodizelin alt ısıl değerinin dizelden düşük olması ve biyodizelin yoğunluğunun dizel yakıtından daha yüksek olması nedeniyle püskürtme başlangıcının daha erken olmasıdır. Bu sayede yanma daha erken başlayıp daha erken bitmekte ve EGS azalmaktadır. Tüm yük ve püskürtme avansı değerleri için B0'dan sonra en yüksek EGS değerlerinin B40 yakıtından elde edildiği izlenmiştir. Karışım içerisindeki biyodizel oranının %40 düzeyine çıkması ısıl değerin düşmesine sebep olmaktadır. Ancak, biyodizelin içeriğinde %10-12 oranında

oksijen barındırması ile tam yanma şartlarına yaklaşılmaktadır. Bu sayede, ısıl değerdeki olumsuz etkinin azaldığı düşünülmektedir. Fakat karışım içerisindeki biyodizel oranının daha da artırılması, karışımın ısıl değerinin bir miktar daha düşmesine yol açmaktadır. Bunun sonucu olarak da silindir içi sıcaklık ve basınçlarda azalma görülmektedir. Ayrıca, biyodizelin yoğunluk ve viskozitesinin yüksek olması yakıtın atomizasyonunu kötüleştirmiş ve hava ile ideal bir reaksiyonu engellemiş olabileceği düşünülmektedir.

Püskürtme avansının motorun standart değerinin üzerine çıkarılması durumunda EGS değerleri artmaktadır. Örnek olarak; %75 motor yükünde ve püskürtme avansı +4 ^{o}KA'na değiştirildiğinde B0, B20, B40, B60 B80 ve B100 yakıtlarının EGS değerleri, sırasıyla %1,32, %0,82, %3,07, %1,54, %3,10 ve %1,11 oranında artmıştır. Püskürtme avansı arttırıldığında yanma periyodu daha erken başlamakta ve yanma süresi uzamaktadır. Bunun sonucunda ise silindir içi sıcaklık ve basınç verileri maksimum değerlere ulaşmaktadır.

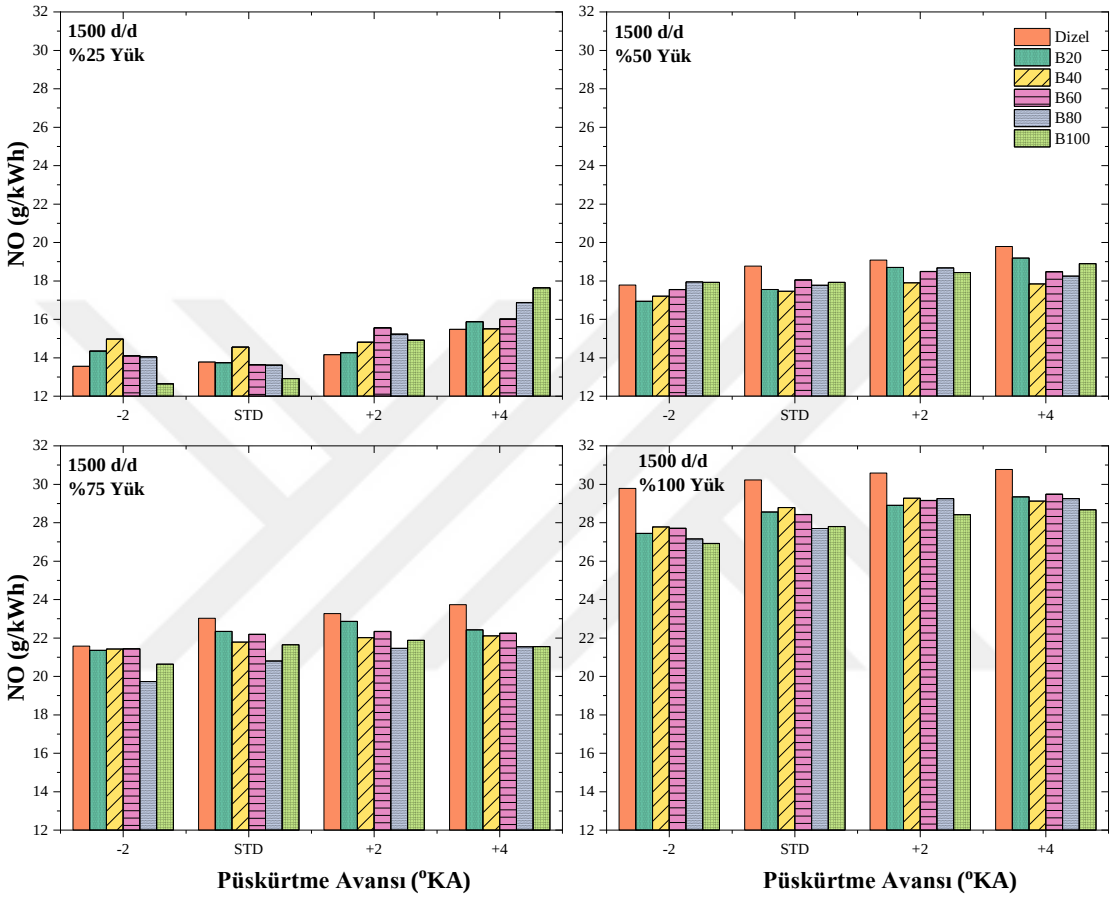
Püskürtme avansının azaltılması ile EGS değerlerinin azaldığı gözlemlenmiştir. Örneğin, %100 motor yükünde ve püskürtme avansı -2 ^{o}KA'ya değiştirildiğinde B0, B20, B40, B60 B80 ve B100 yakıtlarının EGS değerlerinde sırasıyla; %3,02, %5,67, %3,17, %2,92, %2,01 ve %1,04 oranında azalmıştır. Püskürtme avansının azaltılması yakıtların silindire geç enjekte edilmesine yol açmakta ve yanma genişleme zamanında da devam etmektedir. Buna bağlı olarak sıcaklık ve basınç azalmaktadır. Elde edilen EGS sonuçları literatür ile benzerlik göstermektedir [3,74,102,103].

3.1.3.2. Azot monoksit (NO) emisyonlarının püskürtme avansına göre değişimi

Azot (N_2), normal şartlarda yanma sonu reaksiyonuna katılan bir element değildir. Fakat, yanma sonu silindir içi sıcaklıkların artmasıyla oksijen (O_2) ile reaksiyona girerek azot oksit (NO) bileşiğini oluşturur. NO'lar atmosferde oksijenle yeniden reaksiyona girerek NO_2 ve NO_x'e dönüşebilmektedir. Literatürde biyodizel kullanımıyla NO oluşumunun azaldığını belirten çalışmalar olduğu gibi arttığını bildiren çalışmalar da bulunmaktadır [78,104–108]. Dizel motorlarındaki NO oluşumunun başlıca sebebi yanma sonu sıcaklık artışıdır. Yanma boyunca oluşan yüksek sıcaklıklarda (1600 ºC'nin üstünde), havanın içerisindeki azot oksijenle reaksiyona girmekte ve NO oluşmaktadır. NO oluşumunun büyük ölçüde silindir içi sıcaklıktan etkilediği, sıcaklık artışıyla birlikte NO'in

oluşumunun arttığı anlaşılmaktadır. NO oluşumu etkileyen diğer faktörler ise silindir içi basınç, yakıt özellikleri, motor çalıştırma parametreleri, tutuşma gecikmesi ve yanma süresidir [12,109–113].

Şekil 3.9'da NO emisyonlarının püskürtme avansına göre değişimleri görülmektedir.



Şekil 3. 9. NO emisyonlarının püskürtme avansına göre değişimi

Gerçekleştirilen deneylerde tüm yakıt karışımları için motor yükünün artmasıyla birlikte NO emisyonlarının da arttığı görülmektedir. Örneğin, STD püskürtme avansında B0 yakıtının %25, %50, %75 ve %100 yükteki NO değerleri sırasıyla 13,77, 18,76 g/kWh, 23,03 g/kWh ve 30,22 g/kWh'tir. Genellikle düşük yüklerde NO oluşumu daha az olup, yüksek yüklerde daha fazladır. Motor yükünün artmasıyla birlikte gönderilen yakıt miktarı artacağından hava/yakıt oranı değişecek ve motor daha zengin karışımlarla çalışmaya başlayacaktır. Böylece silindir içi sıcaklık ve basınçlar yükselerek NO emisyonlarını arttıracaktır. Ayrıca, motor yükü arttıkça motor gücünün artması da NO artışının bir başka sebebi olarak gösterilebilir

Karışım içerisindeki biyodizel oranının artması ile NO emisyonlarının azaldığı görülmektedir. %50 motor yükünde ve STD püskürtme avansında B20, B40, B60, B80 ve B100 yakıtlarının NO emisyonları B0'a oranla sırasıyla; %6,45, %6,96, %3,78, %5,25 ve %4,45 oranında azalmıştır. Bu durumun temel nedeni, biyodizelin ısıl değerinin düşük olmasından dolayı silindir içi sıcaklık ve basıncın düşmesidir. Bir başka sebep ise; biyodizelin setan sayısının dizel yakıtından yüksek olması nedeniyle tutuşma gecikmesi süresinin kısalması ve yanmanın daha erken başlamasıdır. Bu sayede, silindir içi sıcaklık ve basınçların ani değişimi önlenmekte ve NO emisyonları azalmaktadır. Biyodizel karışımları içerisindeki en yüksek NO değeri B40 yakıtı ile elde edilmiştir. Karışım yakıtları içerisindeki (B20, B40, B60, B80) optimum güç ve ÖYT verilerine B40 yakıtıyla ulaşılmıştır. Buna bağlı olarak B40 yakıtı kullanımında silindir içi sıcaklıkların oransal olarak artması NO emisyonlarını da arttırmıştır.

Püskürtme avansının motorun standart değerinin üzerine çıkarılması durumunda NO emisyonları artmaktadır. Örnek olarak, %75 motor yükünde ve STD püskürtme avansı +4 ^{o}KA olarak değiştirildiğinde B0, B20, B40, B60 B80 ve B100 yakıtlarının NO değerleri sırasıyla; %3,04, %0,38, %1,50, %0,26, %3,53 ve %4,36 oranında artmıştır. Püskürtme avansının artırılmasıyla birlikte yanma daha erken başlamış ve yanma süreleri artmıştır. Bunların sonucunda silindir içi sıcaklık ve basınç değerleri maksimum olmuş ve NO emisyonlarını arttırmıştır.

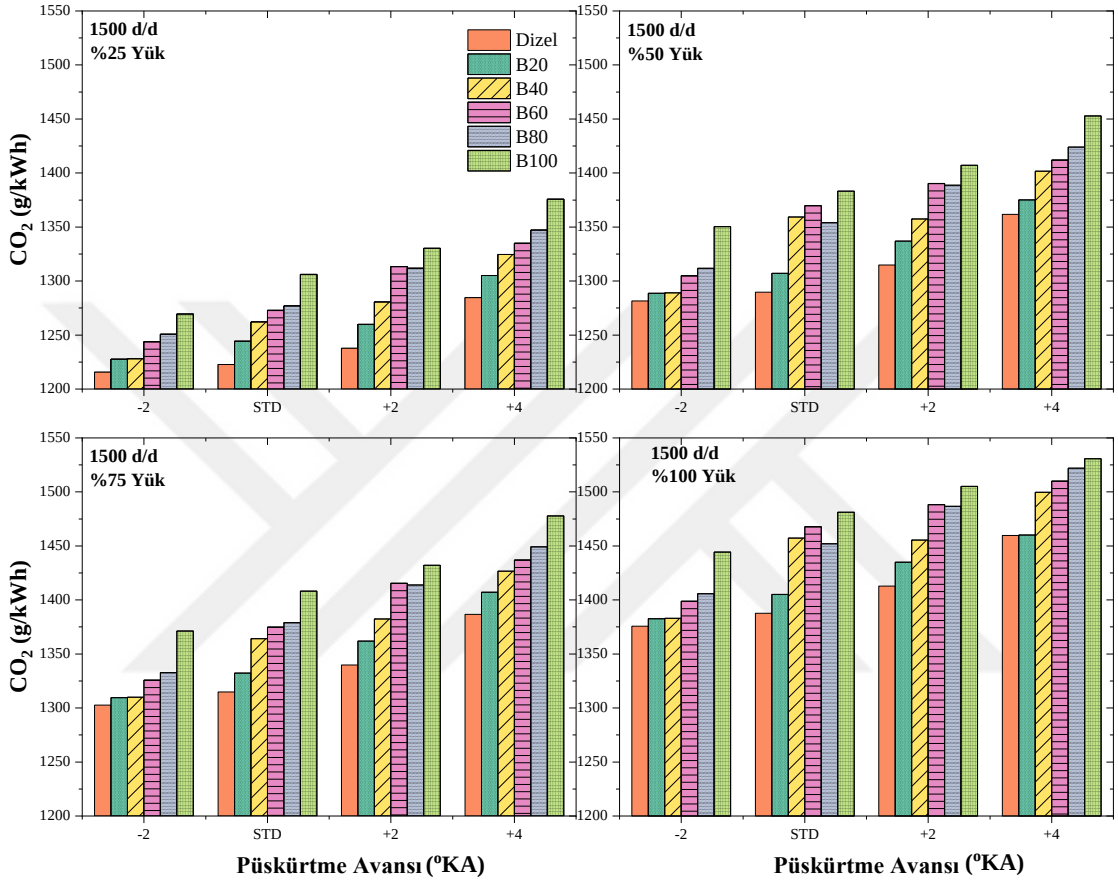
Püskürtme avansının motorun orijinal değerine göre azaltılması ile NO emisyonlarının azaldığı görülmüştür. Örneğin, %100 motor yükünde ve püskürtme avansı -2 ^{o}KA'ya değiştirildiğinde B0, B20, B40, B60 B80 ve B100 yakıtlarının NO değerleri sırasıyla; %1,45, %3,91, %3,49, %2,52, %1,98 ve %3,15 oranında azalmıştır. Tutuşma gecikmesi süresi de NO emisyonlarının oluşumunda önemli bir etkendir. Tutuşma gecikmesi süresinin az olması yanmanın daha erken bitmesine ve genişleme periyoduna daha az sarkmasına sebep olur. Böylece, silindir içi sıcaklıklar ve basınç değerleri düşerek NO oluşumu azalır.

3.1.3.3. Karbondioksit (CO_2) emisyonlarının püskürtme avansına göre değişimi

Egzoz gazları arasında bulunan CO_2 tam yanmayı ifade ettiği için motor performans, emisyon ve yanma analizlerinde oldukça önemli bir parametredir. Yanma sırasında

ortamda yeterli miktarda oksijen olması durumunda CO emisyonu CO_2 'ye dönüşür. Egzoz gazları içerisinde bulunan CO_2 atmosferde sera gazı etkisi yaptığından günümüzde Dünyanın en önemli çevre sorunları arasında yer almaktadır [12,114].

Şekil 3.10'da CO_2 emisyonlarının püskürtme avansına göre değişimleri görülmektedir.



Şekil 3. 10. CO_2 emisyonlarının püskürtme avansına göre değişimi

Motor yükünün artışına bağlı olarak CO_2 emisyonunun arttığı görülmüştür. Örnek olarak, standart püskürtme avansında B0 yakıtının %25, %50, %75 ve %100 yükteki CO_2 emisyonları sırasıyla; 1222,76 g/kWh, 1289,75 g/kWh, 1314,76 g/kWh ve 1387,76 g/kWh'tir. Düşük yüklerde silindir içerisine gönderilen yakıt miktarları birbirine yakın olduğundan, genel olarak tüm yakıtların CO_2 emisyonları birbirine yakındır. Artan motor yükü yanma ürünlerinin egzozda kalma sürelerini azaltmaktadır. Bu sayede, volümetrik verim artmakta ve tam yanma şartlarına yaklaşılmaktadır. Sonuç olarak, bu durum CO_2 emisyonunu artırmaktadır. Ayrıca, artan motor yükü ile tüketilen yakıt miktarı da artmakta ve CO_2 oluşumunu arttırmaktadır.

Karışım içerisindeki biyodizel oranının artması ile CO_2 emisyonun arttığı görülmektedir. %50 motor yükünde ve STD püskürtme avansında yakıtların CO_2 emisyonları sırasıyla; B0 (1289,76 g/kWh), B20 (1307,23 g/kWh), B40 (1359,18 g/kWh), B60 (1369,89), B80 (1353,96 g/kWh) ve B100 (1383,17 g/kWh) olarak ölçülmüştür. Biyodizelin bünyesinden bulunan %10-12 civarında oksijenin yanmayı iyileştirdiği ve CO_2 dönüşüm reaksiyonunu arttırdığı düşünülmektedir [115].

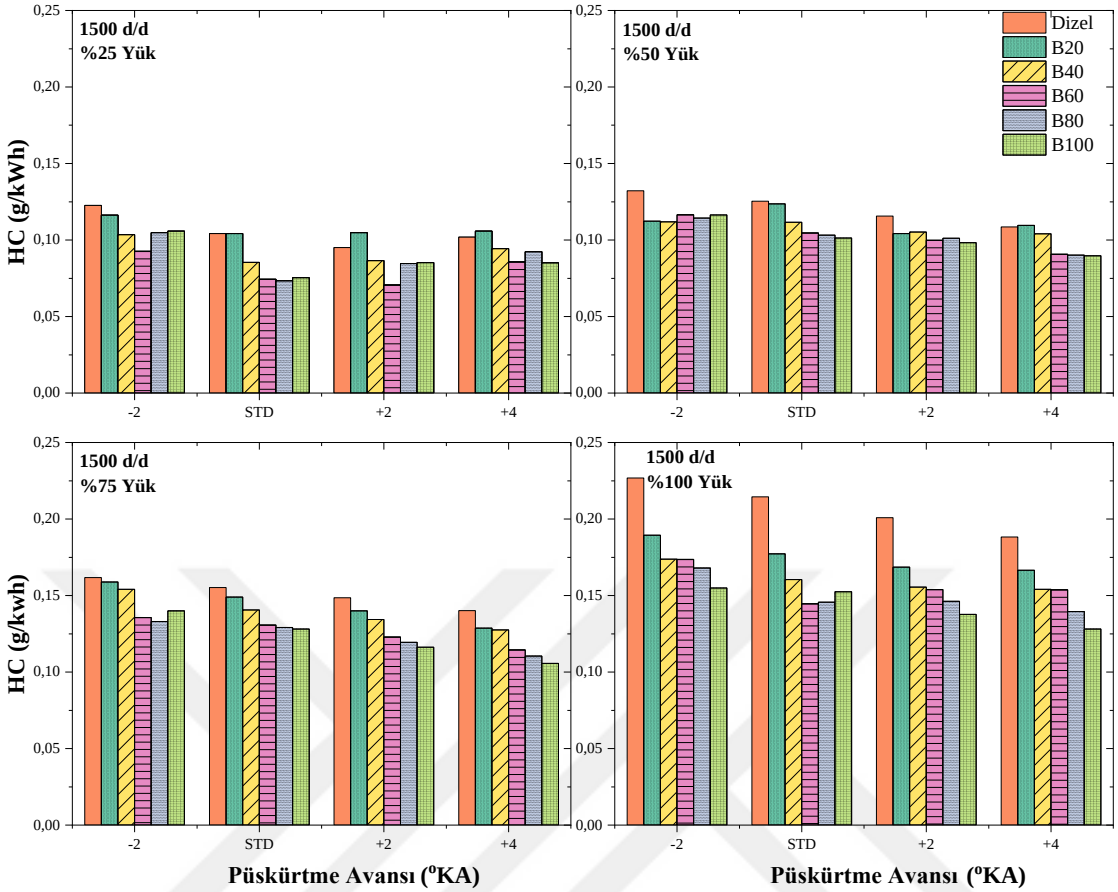
Püskürtme avansının artırılmasıyla bütün test yakıtlarının CO_2 emisyonları artmış ve +4 ^oKA püskürtme avansında yapılan deneylerde maksimum değerlerine ulaşılmıştır. Örneğin; %75 motor yükünde ve püskürtme avansı +4 ^oKA'na değiştirildiğinde B0, B20, B40, B60, B80 ve B100 yakıtlarının CO_2 emisyonları sırasıyla; %5,46, %5,62, %4,57, %4,51, %5,08 ve %4,93 oranında artmıştır. Püskürtme avansının arttırılmasıyla birlikte yanma süresi arttığından bu durum, silindir içi sıcaklık ve basıncın yükselmesine sebep olmaktadır. Bu sayede kimyasal reaksiyon hızının arttığı ve yanma veriminin iyileştiği düşünülmektedir. Bunların sonucunda da tam yanma reaksiyonu olan CO_2 emisyonu artış göstermektedir.

Püskürtme avansının azaltılması ile CO_2 emisyonlarının azaldığı görülmüştür. Örnek olarak, %100 motor yükünde püskürtme avansı -2 ^oKA'na değiştirildiğinde B0, B20, B40, B60, B80 ve B100 yakıtlarının CO_2 değerleri sırasıyla; %0,87, %1,61, %5,08, %4,70, %3,18, ve %2,48 oranında azalmıştır. Bu durum, yakıtların yanma için gerekli zamanı bulamaması ve tam yanma şartlarının gerçekleşmemesinden kaynaklanabilir.

3.1.3.4. Hidrokarbon (HC) emisyonlarının püskürtme avansına göre değişimi

HC bileşikleri hidrojen ve karbondan meydana gelmektedir. HC oluşumunun temel sebebi oksijenin yetersiz olması ve yakıtın tutuşma sıcaklığına ulaşamamasıdır. İçten yanmalı motorlarda yanma esnasında, silindir cidarlarına yakın kısımlarda yanmanın hiç gerçekleşmediği belirtilmektedir. Alev sönme bölgesi olarak adlandırılan bu kısımlarda bulunan HC'lerin yanmadan egzoz kanalına girmesi HC oluşumunun ana kaynağı olarak gösterilebilir [12,116–118]

Şekil 3.11'de HC emisyonlarının farklı püskürtme avanslarındaki değişimleri görülmektedir.



Şekil 3. 11. HC emisyonlarının püskürtme avansına göre değişimi

Genel olarak, motor yükünün artmasıyla birlikte HC emisyonları artmış ve %100 motor yükünde maksimum değerine ulaşmıştır. Örneğin, %100 yük ve STD püskürtme avansında B80 yakıtının %25, %50, %75 ve HC emisyonu değerleri sırasıyla; 0,1042 g/kWh, 0,1233 g/kWh, 0,1552 g/kWh ve 0,2145 g/kWh 'tir. Motor yükünün artmasıyla birlikte HC emisyonu artış göstermektedir. Motor yükünün artırılmasıyla hava/yakıt oranının azalması, püskürtülen yakıtın silindir cidarlarına kadar ilerlemesine sebep olmakta ve yakıt hüzmesinin çekirdeğindeki yakıt konsantrasyonunu daha fazla artırmaktadır. Bu doğrultuda, yapılan testlerde, artan motor yüküyle birlikte HC emisyonları da artmaktadır.

Genel olarak karışım içerisindeki biyodizel oranının artması ile HC emisyonlarının azaldığı görülmektedir. %50 motor yükünde ve motorun orijinal püskürtme avansında yapılan deneylerde B20, B40, B60 B80 ve B100 yakıtlarının HC emisyonları B0' kıyasla; %1,40, %10,95, %16,54, %17,64 ve %19,19 oranında azalmıştır. Biyodizelin içeriğinde

bulunan oksijen, artan sıcaklıklarla beraber zengin hava-yakıt karışım bölgelerinde oksidasyon hızlarını arttırır. Böylece HC emisyonlarında azalma görülür.

Püskürtme avansının arttırılması ile HC emisyonunun azaldığı görülmüştür. Örnek olarak, %75 motor yükünde ve püskürtme avansı +4 ^{o}KA'ya değiştirildiğinde HC değerleri %9,73 (B0), %13,68 (B20), %9,33 (B40), %12,42 (B60), %14,42 (B80) ve %17,57 (B100) oranında azalmıştır. Yakıt enjeksiyonunun daha erken yapılması yakıtlara tam yanma için zaman sağlamış ve HC emisyonlarının azalmasına yol açmıştır. Ayrıca, biyodizelin tutuşma gecikmesi süresinin dizelden az olması yanmanın erken başlamasına sebep olur. Biyodizelin bu avantajının yanı sıra püskürtme avansının da arttırılması yanma süresini uzatır ve yanmayı daha da verimli hale getirerek HC emisyonunun düşmesine yol açar.

Püskürtme avansının azaltılması ile HC emisyonlarının arttığı görülmüştür. Örneğin, %100 motor yükünde ve püskürtme avansı -2 ^{o}KA'ya değiştirildiğinde B0, B20, B40, B60 B80 ve B100 yakıtlarının HC değerleri sırasıyla; %5,72, %6,88, %8,28, %20,04, %15,22 ve %1,67 oranında artmıştır. Bu artış; yakıtın geç püskürtülmesi sebebiyle yanma süresinin kısalması ve yanma için gerekli oksijen miktarının yetersizliğinden kaynaklanabilir.

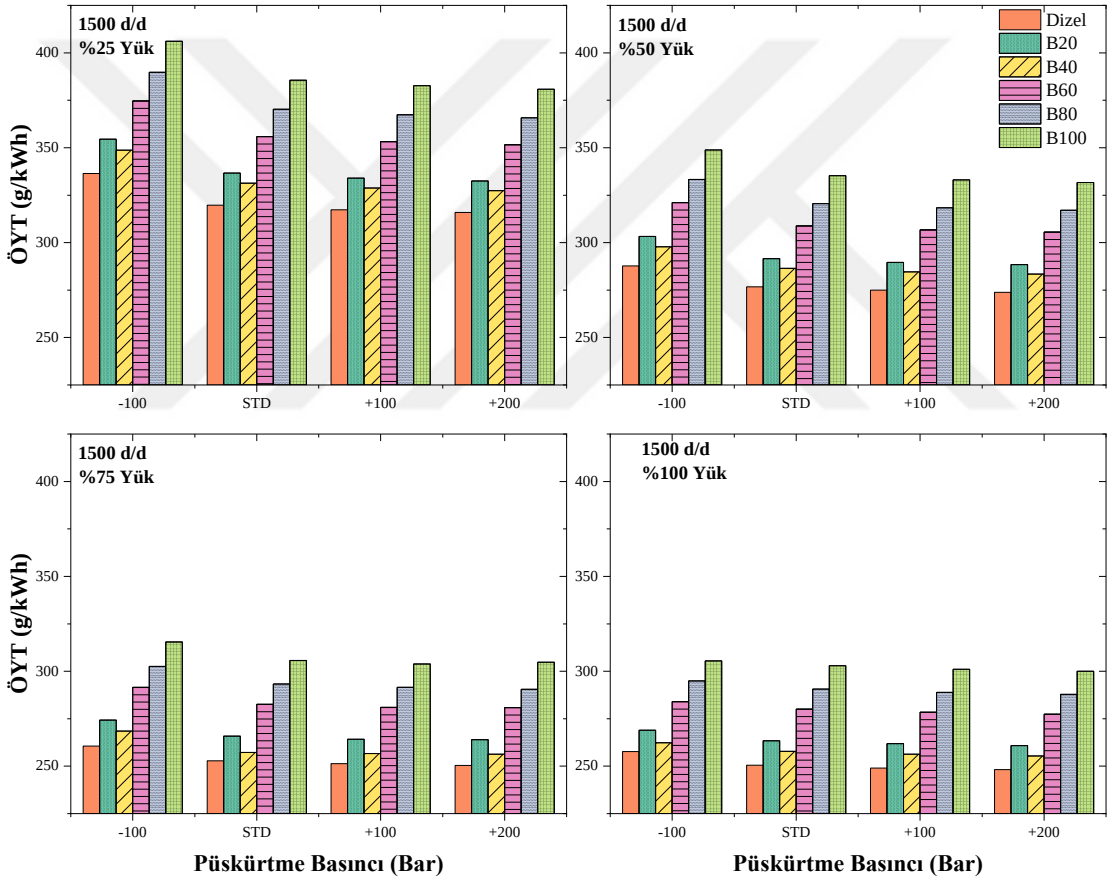
3.2. Püskürtme Basıncına Bağlı Değişimlerin Analizi

3.2.1. Motor performans sonuçlarının analizi

3.2.1.1. ÖYT'nin püskürtme basıncına bağlı olarak değişimi

Deney motoru belirli bir avans haritasına göre çalışmaktadır. Buna göre, motorun STD püskürtme avans değerleri %25 yükte 15 ^{o}KA, %50 yükte 16 ^{o}KA, %75 yükte 17 KA ve %100 yükte 18 ^{o}KA'dır. Test motorunun püskürtme basınç değerleri ise; %25 yükte 750 bar, %50 yükte 900 bar, %75 yükte 1300 bar ve %100 yükte 1600 bardır. Deney aşamasında püskürtme basıncı motorun STD değerine göre 100 bar'lık farkla iki kademe yukarı ve bir kademe aşağı olacak şekilde ayarlanmıştır. Püskürtme basıncı ile ilgili grafiklerde bu kısımlar sırasıyla -100, STD, +100 ve +200 olarak gösterilmiştir.

Motor yükünün artmasıyla birlikte ÖYT değerlerinin azaldığı görülmüştür. Örneğin; STD püskürtme basıncında B60 yakıtının %25, %50, %75 ve %100 yükteki ÖYT değerleri sırasıyla; 355,95, 308,78, 282,66 ve 280,09 g/kWh'dir. Motor yükünün artması ile birim zamanda tüketilen yakıt miktarı artmaktadır. Motor yükündeki bu artışla birlikte ısı kayıpları azalmakta ve düşük yüklere göre silindir içi basınç değerleri daha yüksek seviyelere çıkmaktadır. Bu sayede, silindir içerisine alınan yakıtın yanması için daha elverişli bir ortam oluşmaktadır. Bunların sonucunda, motordan elde edilen güç artmaktadır. Ancak, püskürtülen yakıt miktarındaki artış motor gücündeki artış oranından daha az olduğu için ÖYT düşmektedir.



Şekil 3. 12. ÖYT'nin püskürtme basıncına göre değişimi

Karışım içerisindeki biyodizel oranının artması ile ÖYT değerlerinin arttığı görülmektedir. Örneğin, motor yükünün %50 olduğu ve STD püskürtme basıncı ile yapılan deneylerde elde edilen ÖYT değerleri B0 ile kıyaslandığında; %5,34 (B20), %3,49 (B40), %11,57 (B60), %15,79 (B80) ve %21,15 (B100) oranında artış

gerçekleşmiştir. Biyodizel kullanımı ile özgül yakıt tüketiminin artmasının temel sebebi, biyodizelin enerji içeriğinin dizelden düşük olmasıdır. Başka bir ifade ile; biyodizelin içeriğinde oksijen bulunmasından dolayı alt ısıl değeri dizele kıyasla daha düşüktür.

ÖYT'nin püskürtme basıncına bağlı olarak değişimleri Şekil 3.12'de görülmektedir. Biyodizel kullanımıyla ÖYT'nin artmasının bir başka sebebi ise gizli buharlaşma ısısının dizelden daha yüksek olmasıdır [12,119,120]. Bu nedenle, biyodizelin buharlaşması daha yavaş gerçekleşmekte ve yanma performansı olumsuz yönde etkilenmektedir. Ayrıca, biyodizelin viskozite ve yoğunluğunun dizelden yüksek olması da ÖYT'yi arttıran bir başka etken olarak gösterilebilir.

En düşük ÖYT değerlerinin B0 yakıtı ile elde edildiği, en yüksek ÖYT değerlerinin ise B100 kullanımıyla elde edilmiştir. B0'dan sonra en düşük ÖYT değerinin B40 yakıtıyla elde edildiği görülmüştür. Biyodizel oranının %40 düzeyine çıkması ısıl değerin düşmesine sebep olmaktadır. Ancak, biyodizelin içeriğinde %10-12 oranında oksijen bulundurması ile tam yanma şartlarına yaklaşılmaktadır. Böylece, ısıl değerdeki olumsuz etkinin tolere edildiği düşünülmektedir. Fakat karışım içerisindeki biyodizel oranının daha da artırılması, karışımın ısıl değerinin bir miktar daha düşmesine yol açmaktadır. Bunun sonucu olarak da motor gücünde azalma ve ÖYT'de artış görülmektedir. Motorun common rail yüksek basınçlı yakıt enjeksiyon sistemine sahip olması, biyodizelin yoğunluk ve viskozitedeki dezavantajlarını en aza indirmiştir. Biyodizel kullanımı ile ÖYT değerlerinin birbirine yakın çıkması ve B0 ile farkın sınırlı kalmasında bu durumun etken olduğu düşünülmektedir. Elde edilen sonuçlar literatürdeki birçok çalışma ile benzerlik göstermektedir [3,96–98].

Püskürtme basıncının artırılması ile ÖYT değerleri azalmıştır. Örneğin, %75 motor yükünde ve püskürtme basıncı +200 bar olarak değiştirildiğinde ÖYT değerleri; 250,37 (B0), 263,93 (B20), 256,25 (B40), 280,09 (B60), 290,48 (B80) ve 304,74 (B100) g/kWh olmuştur. %75 motor yükünde en verimli sonuçların +200 bar püskürtme basıncında elde edildiği görülmüştür. Basıncının artırılmasıyla yakıtların damlacık çapları küçülmüştür. Bu sayede yakıtların atomizasyonu ve buharlaşması iyileşmiş ve yanma verimleri yükselmiştir. Biyodizelin yoğunluk ve viskozitesinin yüksek olmasından dolayı püskürtme basıncının artırılması ile ÖYT bakımından oldukça olumlu sonuçlar elde

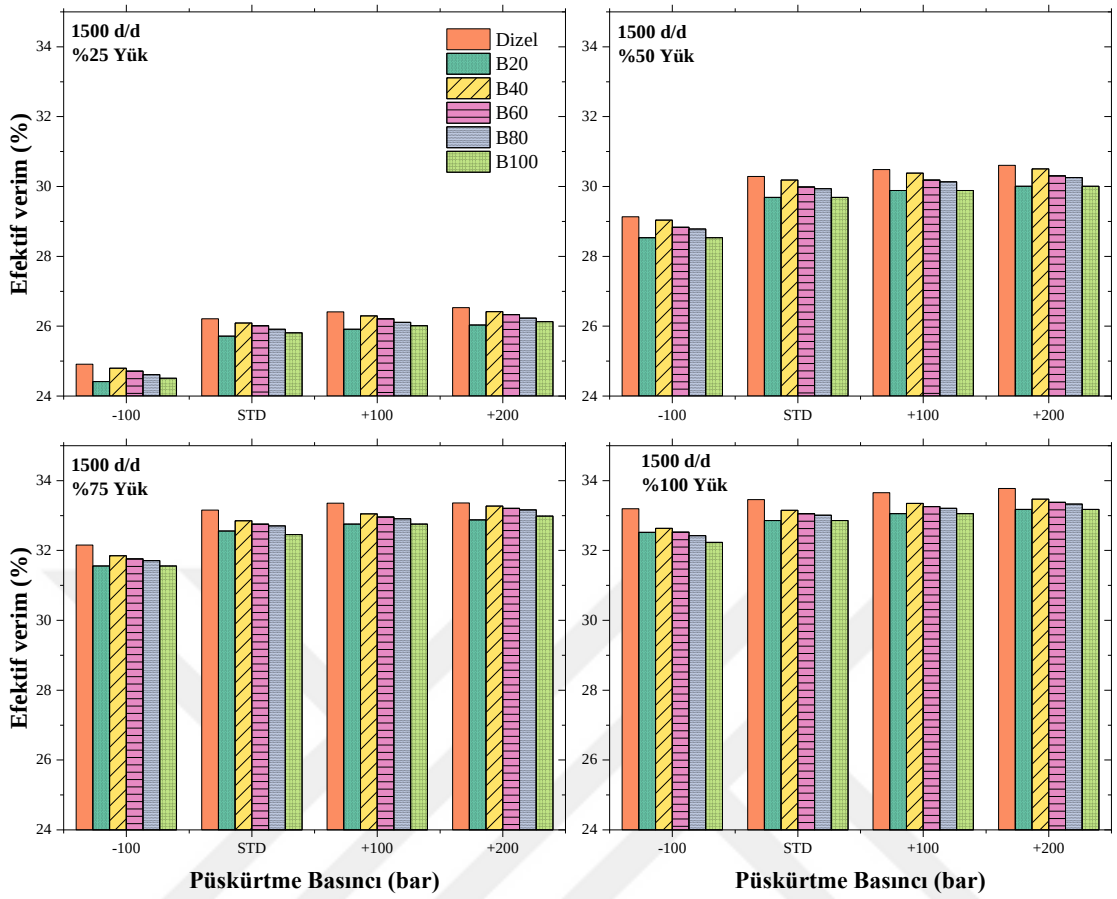
edilmiştir. Böylece, karışım içerisindeki biyodizel oranı yüksek yakıt karışımlarının (B80 ve B100) yoğunluk ve viskozitedeki olumsuz etkilerinin tolere edildiği düşünülmektedir.

Püskürtme basıncının azaltılması ile ÖYT değerlerinin arttığı gözlemlenmiştir. Örneğin, %100 motor yükünde püskürtme basıncı -100 bar'a değiştirildiğinde elde edilen; ÖYT değerleri; 257,66 (B0), 268,99 (B20), 262,27 (B40), 284,04 (B60), 294,07 (B80) ve 305,49 (B100) g/kWh olarak hesaplanmıştır. Püskürtme basıncının azaltılması yakıt damlacık çapının büyümesine yol açmaktadır. Bunun sonucunda yakıtların buharlaşması daha uzun sürede gerçekleşmektedir. Bu durum, yanma veriminin düşmesine yol açmaktadır. Ayrıca, yakıt damlacık çapının büyümesi kütlesel olarak daha fazla yakıtın enjekte edilmesine yol açtığı için ÖYT'nin artmış olduğu düşünülmektedir.

Deney sonuçları incelendiğinde; eski nesil yakıt enjeksiyon sistemine sahip motorların ÖYT değişimlerinin altında değerler tespit edilmiştir. Bu durumun sebebi, deney motorunun yüksek basınçlı (maksimum 1800 bar) enjeksiyon sistemine sahip olmasıdır. Bu sayede yakıtların atomizasyonu ve buharlaşması iyileşmektedir. Bunların sonucunda yakıt zerrecikleri hava ile daha homojen ve daha hızlı bir şekilde karışım oluşturarak yanmayı iyileştirmektedir. ÖYT'nin püskürtme basıncına bağlı değişimi ile elde edilen sonuçlar literatürde yapılmış olan çalışmaların birçoğu ile benzerlik göstermektedir [71,99,121].

3.2.1.2. Efektif verimin püskürtme basıncına bağlı olarak değişimi

Sabit devir, dört farklı yük ve altı farklı yakıt ile gerçekleştirilen deneylerde efektif verimin püskürtme basıncına bağlı olarak değişimi Şekil 3.13'de görülmektedir. Motor yükünün artışıyla beraber tüm yakıtlar için efektif verim artmıştır. Örneğin, STD püskürtme basıncında B100 yakıtının %25, %50, %75 ve %100 yükteki efektif verim değerleri sırasıyla; %25,81, %29,68, %32,55 ve %32,85'tir. Artan motor yükü ÖYT'nin azalmasına ve efektif verimin artmasına yol açmaktadır.



Şekil 3. 13. Efektif verimin püskürtme basıncına bağlı olarak değişimi

Karışım içerisindeki biyodizel oranının artmasıyla efektif verimde nispeten bir azalma görülmüştür. Örneğin, STD püskürtme basıncı ve %50 motor yükünde B20, B40, B60, B80 ve B100 yakıtlarının efektif verim değerleri B0 ile kıyaslandığında sırasıyla; %1,98, %0,33, %0,99, %1,15, ve %1,98 oranında azalmıştır. Bu düşüş biyodizelin ısıl değerinin dizelden düşük olmasına bağlı olarak ÖYT'nin artmasında kaynaklanmaktadır. Yakıtların efektif verimleri arasındaki fark sınırlı miktardadır. Bu durum, testlerde kullanılan yakıt karışımlarının ısıl değerlerinin birbirine yakın olmasından kaynaklanmaktadır.

Püskürtme basıncının STD değerinin üzerine çıkarılmasıyla genel olarak efektif verim de artmıştır. Örneğin, %75 motor yükünde püskürtme basıncı STD değerine göre +200 bar arttırıldığında B0, B20, B40, B60 B80 ve B100 yakıtları için efektif verim değerleri sırasıyla; %0,60, %0,98, %1,27, %1,37, %1,39 ve %1,63 oranında artmıştır. Basıncın +200 bar artırılması yakıtın daha iyi atomize olmasına ve buharlaşmasına yardımcı olmaktadır. Bu sayede, daha homojen bir karışım oluşmakta, yanma iyileşmekte ve ÖYT

düşmektedir. Sonuç olarak, püskürtme basıncının STD değere göre +200 bar'a değiştirilmesi efektif verimi olumlu yönde etkilemiş ve efektif verimin artışına yol açmıştır. Püskürtme basıncının arttırılması özellikle yoğunluğu yüksek olan yakıtların efektif veriminde daha fazla artışa yol açmıştır.

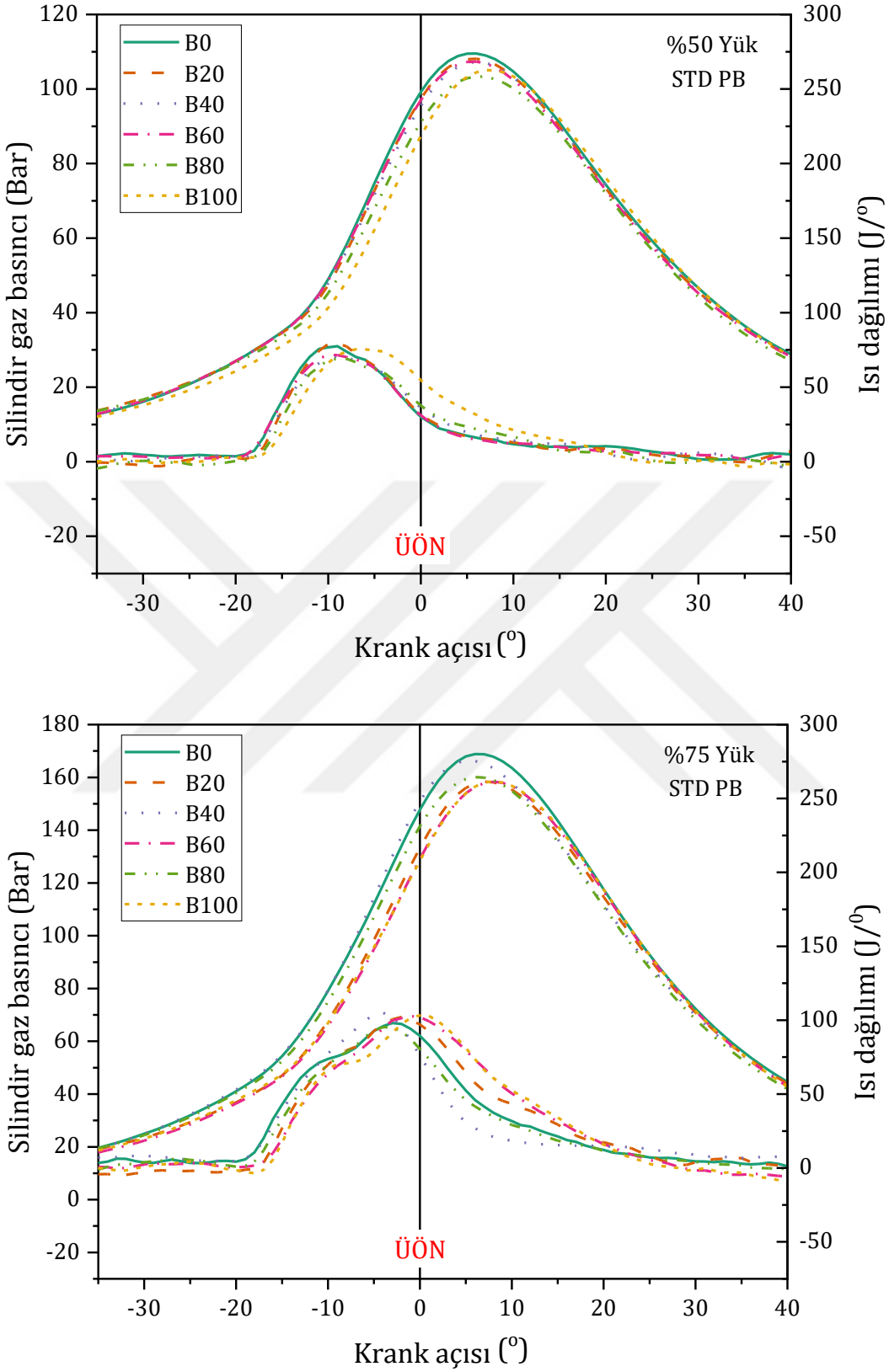
Genel olarak püskürtme basıncının azaltılması ile efektif verimin azaldığı görülmüştür. Örnek olarak, %100 motor yükünde püskürtme basıncının STD değerine göre -100 bar azaltılmasıyla B0, B20, B40, B60 B80 ve B100 yakıtları için efektif verim değerleri sırasıyla; %0,77, %1,02, %1,55, %1,60, %1,77 ve %1,90 oranında azalmıştır. Püskürtme basıncının azaltılması, yakıt damlacık çapını arttırmaktadır. Buna bağlı olarak, yakıtın buharlaşma süresi artmakta ve yanma kötüleşmektedir. Ayrıca, basıncın azaltılması tutuşma gecikmesi süresinin artmasına, yanmanın kötüleşmesine ve efektif verimin düşmesine yol açmaktadır. Basıncın orijinal değerinin altında olması tüm yakıtlarda efektif verimi düşürmüştür. Elde edilen sonuçlar literatürdeki birçok çalışma ile benzerlik göstermektedir [99,122,123].

3.2.2. Yanma analizi

3.2.2.1. Silindir gaz basınçları ve ısı dağılımlarının püskürtme basıncına bağlı değişimi

Silindir gaz basınçları ve ısı dağılımlarının %50 ve %75 motor yükünde ve STD PB'deki değişimleri Şekil 3.14'te görülmektedir.

Şekil 3.14 incelendiğinde, bütün yüklerde genel olarak karışım yakıtındaki biyodizel oranının artmasıyla birlikte silindir gaz basınçlarında bir azalma gözlemlenmiştir. Örnek olarak, STD püskürtme basıncı ve %50 motor yükünde B0, B20, B40, B60, B80 ve B100 yakıtlarının maksimum silindir gaz basınç değerleri ve konumları sırasıyla; 109,52 (6 ^{o}KA) 108,11 bar (6 ^{o}KA), 107,26 bar (5 ^{o}KA), 107,34 bar (6 ^{o}KA), 103,36 (6 ^{o}KA) ve 105,04 bar (7 ^{o}KA)'dır. Biyodizel kullanımı ile tutuşma gecikmesi süresinin kısalması bu düşüşün ana sebebi olarak gösterilebilir. Ayrıca, biyodizelin yüksek yoğunluk ve viskozite değerleri atomizasyonu bozmakta ve buna bağlı olarak da hava/yakıt karışımının kötüleşmesine yol açmaktadır. Bu durum, yanma periyodunu uzatmakta ve maksimum silindir gaz basıncı ÜÖN'den uzaklaşmasına sebep olmaktadır.



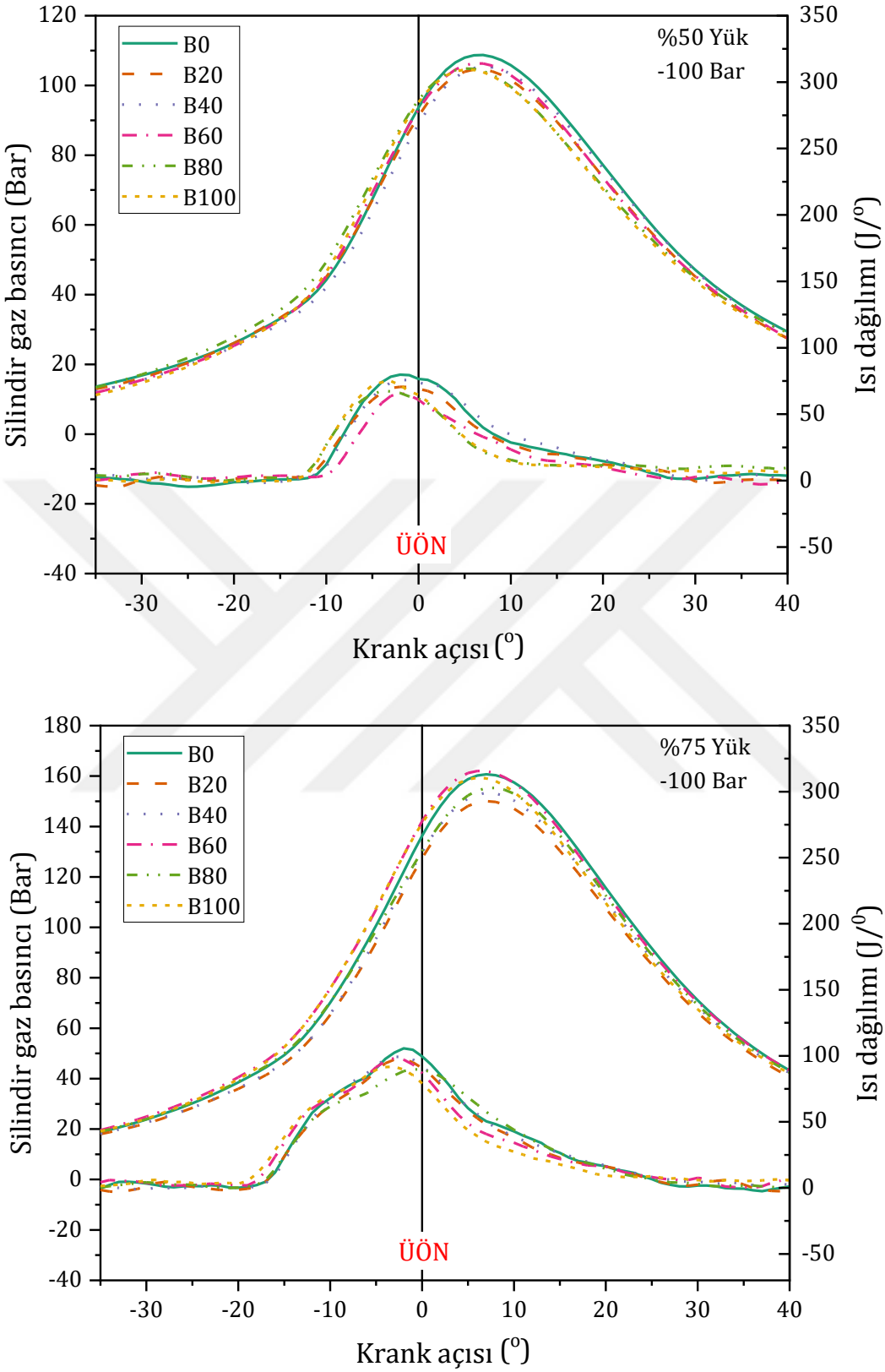
Şekil 3. 14. Silindir gaz basınçları ve ısı dağılımlarının STD PB'daki değişimleri

Biyodizelin tutuşma gecikmesinin kısa olmasına rağmen, bünyesinde bulunan oksijen tutuşma ve yanma sürelerini hızlandırmaktadır. Bu sayede, dizel ve biyodizel karışımlarının maksimum silindir gaz basınçlarının konumları arasındaki farkın minimum olduğu düşünülmektedir [99]. Biyodizel ve karışım yakıtların ısı dağlım eğrileri incelendiğinde, ısı açığa çıkışının dizele kıyasla daha ileri bir noktada başladığı ve değerinin ise daha yüksek seviyede olduğu gözlemlenmiştir. Örneğin, STD püskürtme basıncı ve %75 motor yükünde B0, B20, B40, B60, B80 ve B100 yakıtlarının açığa çıkan ısı oranları sırasıyla; 99,80 J/^{o}KA, 102,21 J/^{o}KA, 105,03 J/^{o}KA, 101,43 J/^{o}KA, 95,32 J/^{o}KA ve 102,84 J/^{o}KA olarak hesaplanmıştır.

Biyodizel içeren yakıtların ısı dağılımı eğrileri incelendiğinde dizelden daha geç yükselmeye başladığı görülmektedir. Biyodizel ve karışımlarının ısıl değerinin dizelden düşük olması, yanma periyodunun genişlemesine ve silindir gaz basınçlarının ve ısı dağılımının düşmesine yol açmaktadır. Bu durum maksimum silindir gaz basıncını ÜÖN'den uzaklaştırmaktadır. Sonuç olarak, biyodizelin alt ısıl değerinin ve maksimum silindir gaz basıncının dizelden düşük olması, bu iki değere bağımlı olan ısı dağılımı da negatif yönde etkilemektedir.

Standart PB çalışma motor yükünün artmasıyla birlikte bütün yakıtlar için silindir gaz basıncı ve ısı açığa çıkışı artmıştır. Silindir gaz basınçlarındaki bu artış, birim zamandaki yakıt tüketimimin artmasından kaynaklanmaktadır. Bu sayede, yanma sonu sıcaklık ve basınç yükselmektedir.

Silindir gaz basınçları ve ısı dağılımlarının %50 ve %75 motor yükünde ve -100 bar'daki değişimleri Şekil 3.15'te görülmektedir. Püskürtme basıncının azaltılması ile tüm yakıtların maksimum silindir gaz basınç değerleri azalmış ve konumu ÜÖN'den uzaklaşmıştır. Örneğin, %50 motor yükünde ve püskürtme basıncının -100 bar'a değiştirilmesiyle B0, B20, B40, B60, B80 ve B100 yakıtlarının maksimum silindir gaz basınçları ve konumları sırasıyla; 108,71 (7 ^{o}KA) 104,56 bar (7 ^{o}KA), 105,36 bar (7 ^{o}KA), 106,34 bar (6 ^{o}KA), 104,84 bar (5 ^{o}KA) ve 104,51 bar (5 ^{o}KA)'dır. Basıncın azaltılmasıyla yakıt damlacık çapı artmakta ve atomizasyon kötüleşmektedir. Bu durum, ideal bir hava/yakıt karışımının oluşumunu geciktirmektedir.



Şekil 3. 15. Silindir gaz basınçları ve ısı dağılımlarının -100 bar'daki değişimleri

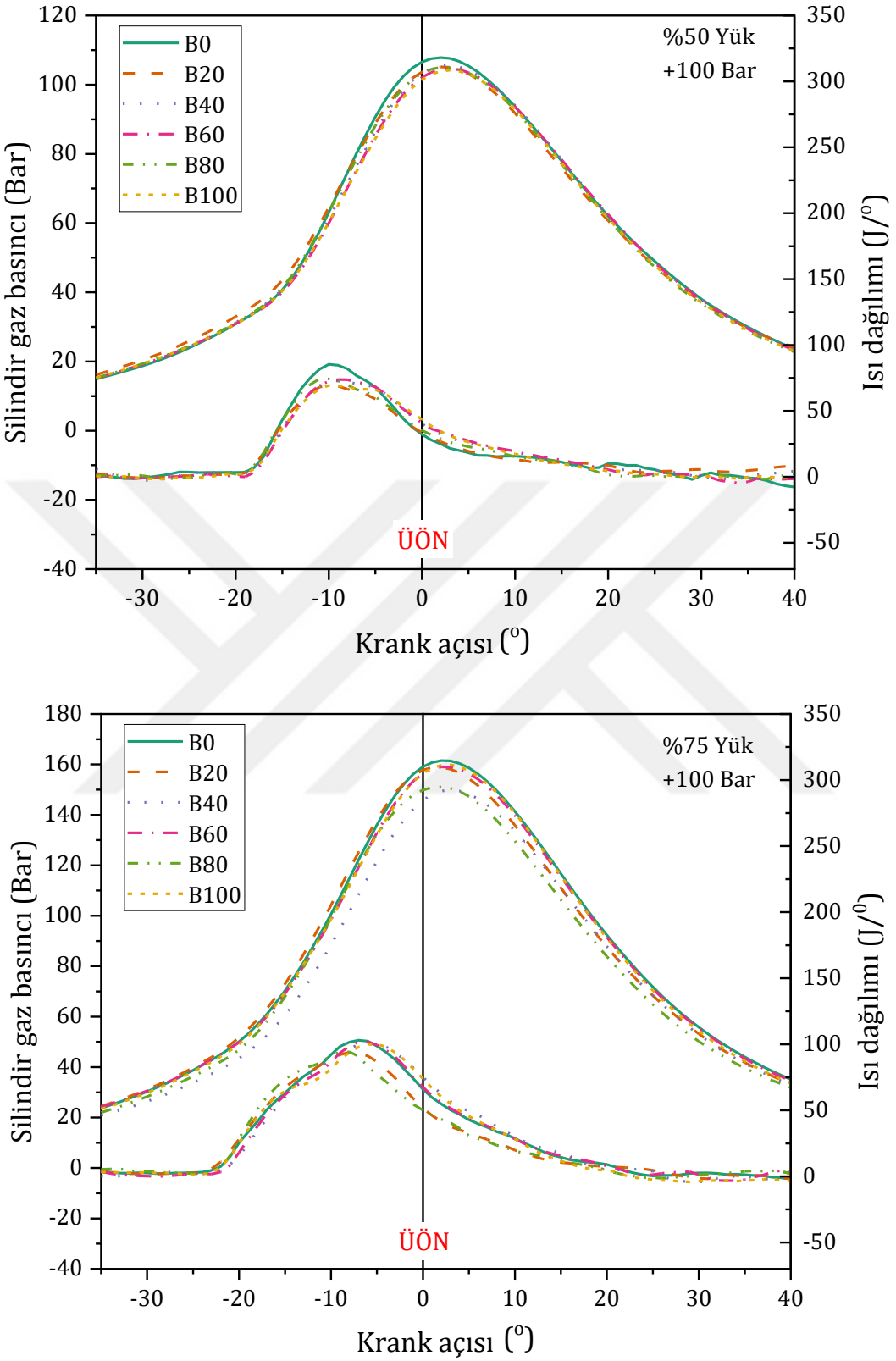
Sonuç olarak, tüm yakıtların maksimum silindir gaz basınçları azalmakta ve konumu ÜÖN'den uzaklaşmaktadır. Bu durumun bir başka sebebi ise, azalan püskürtme basıncıyla birlikte tutuşma gecikmesi süresinin artmasıdır.

Püskürtme basıncının azaltılmasıyla tüm yakıtların ısı dağılımlarında sınırlı miktarda azalma görülmüştür. Bu durum, deney motorunun common rail yüksek basınçlı yakıt sistemine sahip olması ile ilgilidir. %75 motor yükünde püskürtme basıncı -100 bar olarak değiştirildiğinde maksimum ısı dağılımları; B0 için 105,64 J/^{o}KA, B20 için 97,38 J/^{o}KA, B40 için 99,50 J/^{o}KA, B60 için 98,30 J/^{o}KA, B80 için 89,87 J/^{o}KA ve B100 için 91,76 J/^{o}KA olarak hesaplanmıştır.

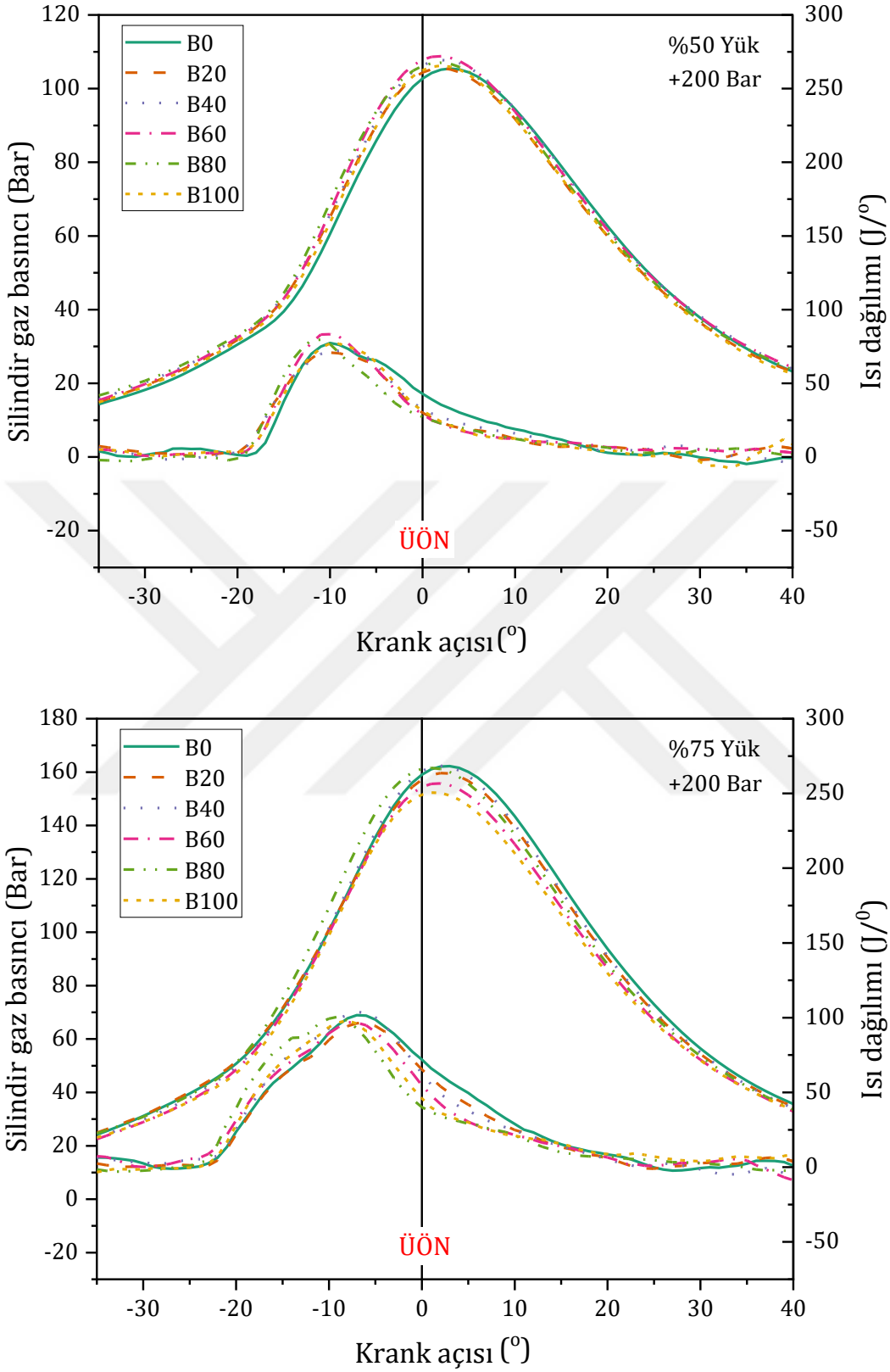
PA basıncının azaltılması şartlarında, motor yükünün artması ile maksimum silindir gaz basınçları artmıştır. Örneğin, %75 motor yükü ve -100 bar püskürtme basıncında B0, B20, B40, B60, B80 ve B100 yakıtlarının maksimum silindir gaz basınç değerleri sırasıyla; %32,35, %30,32, %31,28, %31,51, %34,19 ve %31,83 oranında artmıştır. Benzer olarak artan yük ile ısı dağılımları da yükselişe geçmiştir. Örnek olarak, -100 bar püskürtme basıncında motor yükünün %75'e çıkarılmasıyla B0, B20, B40, B60, B80 ve B100 yakıtlarının ısı dağılımları sırasıyla; %24,83, %27,47, %23,95, %33,08, %25,33 ve %18,47 oranında artmıştır.

Silindir gaz basınçları ve ısı dağılımlarının %50 ve %75 motor yükünde, +100 bar ve +200 bar'daki değişimleri Şekil 3.16 ve 3.17'de görülmektedir.

Püskürtme basıncının artırılması ile silindir gaz basınçlarında iki farklı durum gözlemlenmiştir. B0 ve B20'nin maksimum silindir gaz basınçları azalırken, B80 ve B100'de artış gerçekleşmiştir. Örnek olarak, %50 motor yükünde ve püskürtme basıncı +200 bar'a değiştirildiğinde B0, B20, B40, B80 ve B100 yakıtlarının maksimum silindir gaz basınç değerleri ve konumları sırasıyla 105,45 bar (3 ^{o}KA), 105,53 bar (2 ^{o}KA), 107,72 bar (2 ^{o}KA), 108,77 (1 ^{o}KA) 107,06 bar (2 ^{o}KA) ve 106,24 bar (2 ^{o}KA)'dır. Biyodizel karışımlarının dizelden daha yüksek maksimum silindir gaz basıncı değerine ulaştığı görülmektedir. Bu durum, dizelin yoğunluğunun biyodizelden düşük olması ile ilgilidir. Yoğunluğu düşük olan yakıtlar özellikle yüksek enjeksiyon basınçlarında istenilen düzeyden daha fazla atomize olurlar.



Şekil 3. 16. Silindir gaz basınçları ve ısı dağılımlarının +100 bar'daki değişimleri



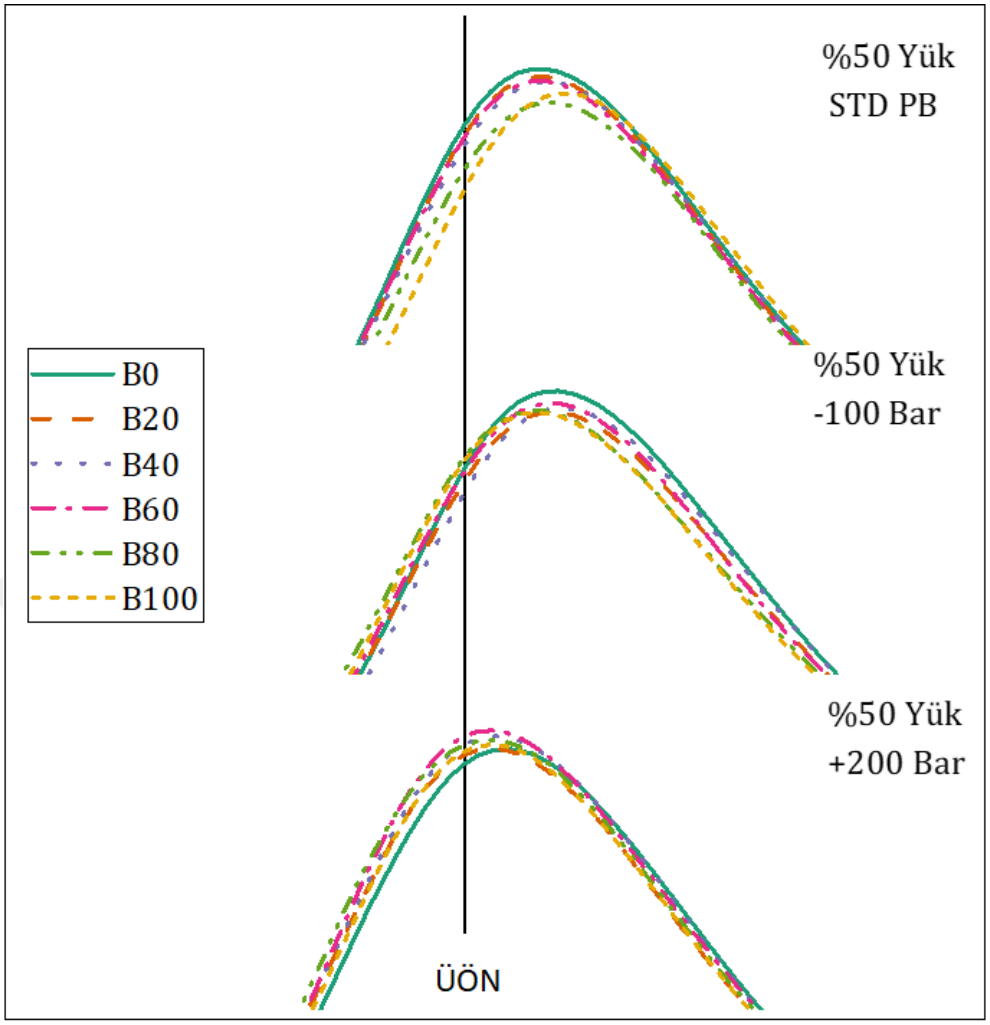
Şekil 3. 17. Silindir gaz basınçları ve ısı dağılımlarının +200 bar'daki değişimleri

Bunun sonucunda, yanma odasının tümüne nüfuz etmesini sağlayacak atalet kuvvetini kaybetmekte ve çok kısa sürede buharlaşmaktadırlar. Yanma odasında belirli bir sıcaklığa ulaşmadan buharlaşan yakıtların maksimum silindir gaz basınçları düşmektedir.

Basıncın artırılması ile biyodizelin yüksek viskozite ve yoğunluğundan kaynaklanan dezavantajının tolere edildiği düşünülmektedir. Ayrıca, püskürtme basıncının artışı maksimum silindir gaz basıncının konumu ÜÖN'ye yaklaştırmıştır.

Şekil 3.17 incelendiğinde %75 motor yükü ve püskürtme basıncının +200 bar'a değiştirilmesiyle oluşan maksimum ısı dağılımları B0 için 101,72 J/^{o}KA, B20 için 96,75 J/^{o}KA, B40 için 104,019 J/^{o}KA, B60 için 96,93 J/^{o}KA, B80 için 100,66 J/^{o}KA ve B100 için 97,96 J/^{o}KA olarak hesaplanmıştır. Püskürtme basıncının artırılmasıyla biyodizel yakıtların ısı açığa çıkışları dizel yakıtından önce olmuştur. Artan püskürtme basıncı, biyodizelin maksimum düzeyde atomize olmasına olanak sağladığı için ısı açığa çıkışı daha erken başlamaktadır.

Püskürtme basıncının artırılması şartlarında, motor yükünün artması ile maksimum silindir gaz basınçları artmış ve konumları ÜÖN'ye yaklaşmıştır, Şekil 3.17. Örneğin, %75 motor yükünde ve püskürtme basıncı +200 bar olarak değiştirilmesiyle B0, B20, B40, B60, B80 ve B100 yakıtlarının maksimum silindir gaz basınç değerleri sırasıyla; %34,87, %33,88, %33,65, %30,17, %33,74 ve %30,24 oranında artmıştır. Motor yükünün artışı ile ısı dağılımları da yükselmiştir. Örnek olarak, +200 bar püskürtme basıncında motor yükünün %75'e çıkarılmasıyla B0, B20, B40, B60, B80 ve B100 yakıtlarının ısı dağılımları sırasıyla; %23,88, %26,31, %30,65, %14,06, %20,93 ve %20,72 oranında artmıştır. Silindir gaz basınçlarının püskürtme basıncına göre konumları Şekil 3.18'de verilmiştir.

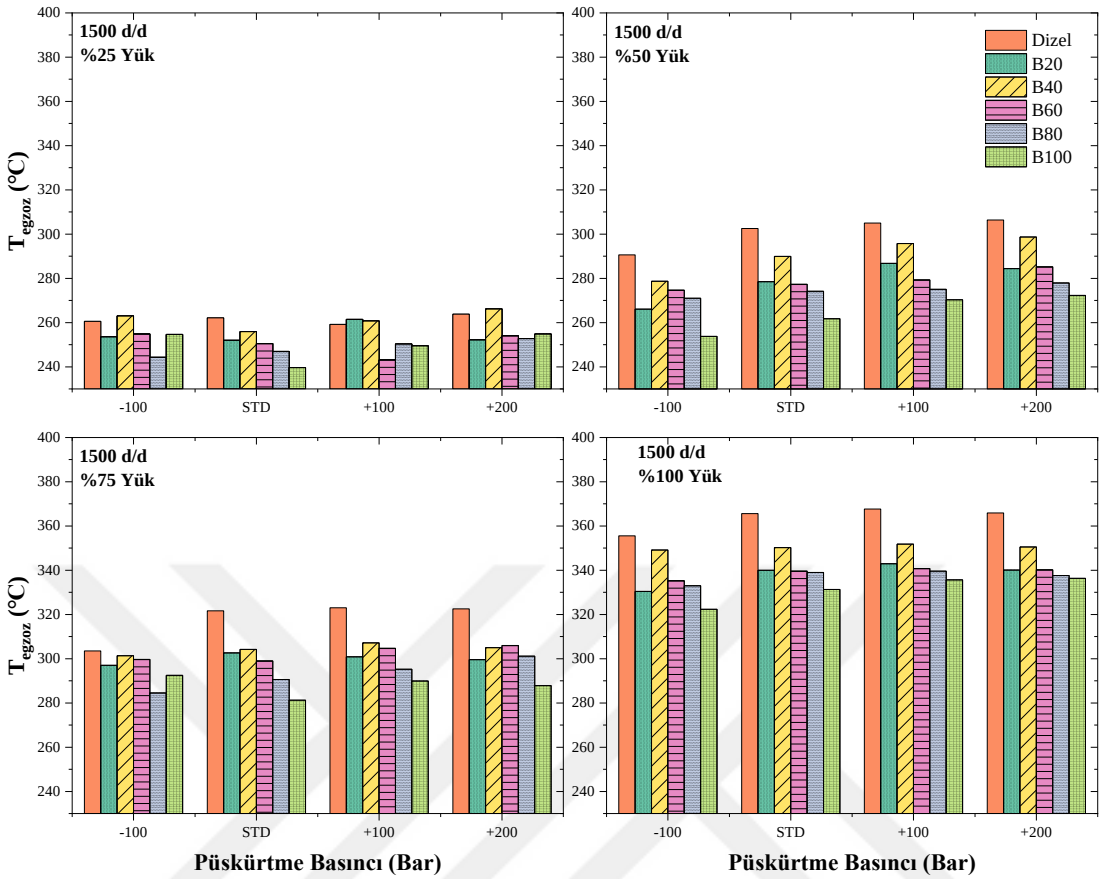


Şekil 3. 18. Silindir gaz basıncı konumunun püskürtme basıncına göre değişimi

3.2.3. Egzoz emisyonlarının analizi

3.2.3.1. EGS'nin püskürtme basıncına bağlı olarak değişimi

Şekil 3.19'da EGS'nin püskürtme basıncına bağlı olarak değişimi görülmektedir. Motor yükünün artmasıyla beraber egzoz manifold sıcaklıklarının da arttığı görülmüştür. Örnek olarak, STD püskürtme basıncında B100 yakıtının %25, %50, %75 ve %100 yükteki EGS değerleri sırasıyla; 239,64 ºC, 261,72 ºC, 281,19 ºC ve 331,34 ºC'dir. Egzoz manifold sıcaklığındaki bu artışın nedeni motor yükünün artması ile silindire püskürtülen yakıt miktarının artmasıdır. Dizel motorlarda motor yükünün artması hava/yakıt oranının azalmasına yol açmaktadır. Bu durum, egzoz gaz sıcaklıklarının artmasına neden olmaktadır.



Şekil 3. 19. EGS'nin püskürtme basıncına bağlı olarak değişimi

Genel olarak, karışım içerisindeki biyodizel oranının artması ile EGS değerlerinin azaldığı görülmektedir. Örneğin, STD püskürtme basıncı ve %50 motor yükünde B0, B20, B40, B60, B80 ve B100 yakıtlarının EGS değerleri sırasıyla; 302,51 ^{o}C, 278,52 ^{o}C, 289,93 ^{o}C, 277,28 ^{o}C, 274,12 ^{o}C ve 261,21 ^{o}C olarak ölçülmüştür. Biyodizel kullanımıyla EGS'deki azalma biyodizelin alt ısıl değerinin dizelden düşük olması ve biyodizelin yanmanın genişleme periyoduna sarkmadan büyük bir kısmının tamamlanmasından kaynaklanmaktadır. Ayrıca, biyodizelin tutuşma gecikmesi süresinin dizelden az olması sebebiyle yanma daha erken başlamış, ani sıcaklık ve basınç artışları önlenmiştir. Tüm yük ve püskürtme basıncı değerleri için B0'dan sonra en yüksek EGS değerlerinin B40 yakıtından elde edildiği izlenmiştir. Karışım içerisindeki biyodizel oranının %40 düzeyine çıkması ısıl değerin düşmesine sebep olmaktadır. Ancak, biyodizelin içeriğinde %10-12 oranında oksijen barındırması ile tam yanma şartlarına yaklaşılmaktadır. Bu sayede, ısıl değerdeki olumsuz etkinin azaldığı düşünülmektedir. Fakat karışım içerisindeki biyodizel oranının daha da artırılması, karışımın ısıl değerinin bir miktar daha

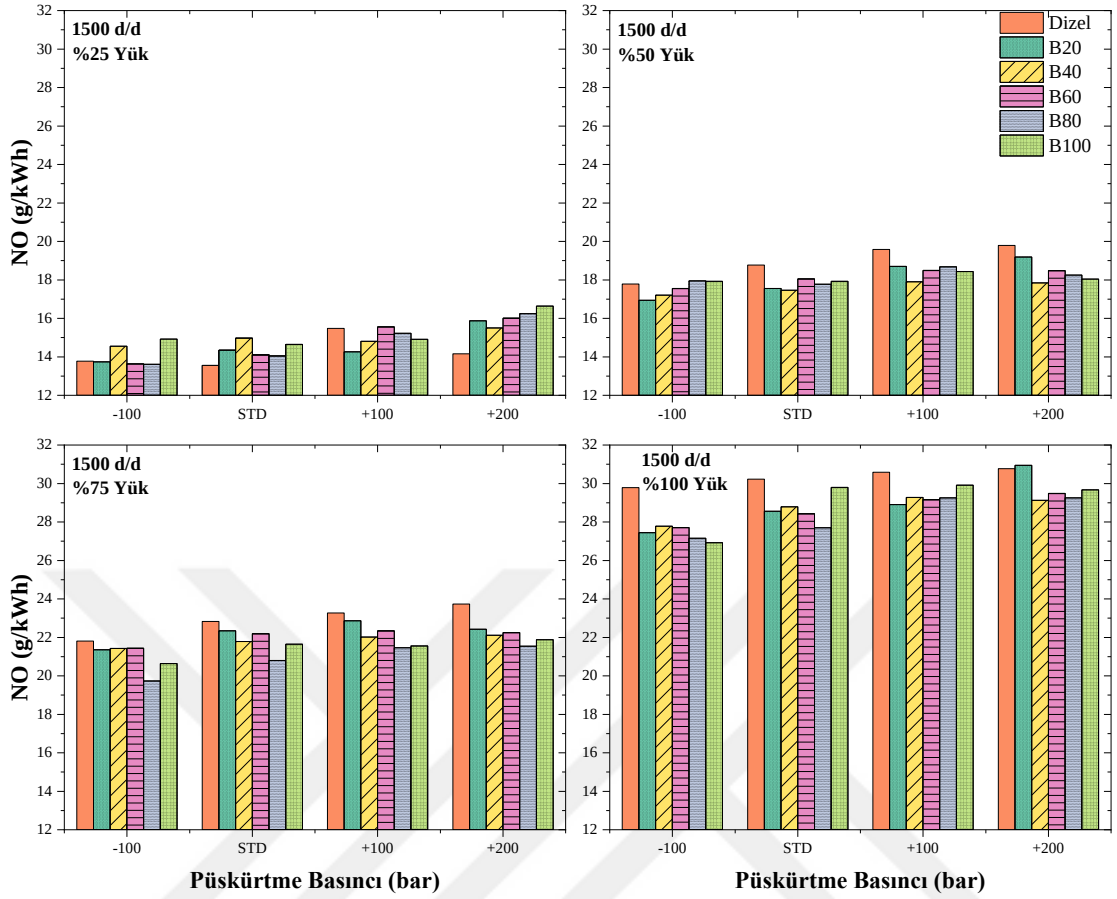
düşmesine yol açmaktadır. Bunun sonucu olarak da silindir içi sıcaklık ve basınçlarda azalma görülmektedir. Ayrıca, biyodizelin yoğunluk ve viskozitesinin yüksek olması yakıtın atomizasyonunu kötüleştirmiş ve hava ile ideal bir reaksiyonu engellemiş olabileceği düşünülmektedir.

Püskürtme basıncının motorun standart değerinin üzerine çıkarılması durumunda EGS değerleri artmaktadır. Örnek olarak, %75 motor yükünde ve püskürtme basıncı +200 bar'a değiştirildiğinde B0, B20, B40, B60 B80 ve B100 yakıtlarının EGS değerleri sırasıyla; %0,28, %-1,02, %0,26, %2,32, %3,64 ve %2,36 oranında değişmiştir. Püskürtme basıncının artırılması yakıtların atomizasyon ve buharlaşmasına olumlu bir etki yapmaktadır. Bu sayede, yanma iyileşmekte ve yanma sonu sıcaklıkları yükselmektedir. Basınç artışıyla birlikte EGS değerlerindeki artışın sınırlı kalması deney motorunun püskürtme basınç haritasına göre çalışması ve STD (orijinal) püskürtme basıncının yüksek olmasıdır.

Püskürtme basıncının azaltılması ile EGS değerlerinin azaldığı gözlemlenmiştir. Örneğin, %100 motor yükünde ve püskürtme basıncı -100 bar'a değiştirildiğinde B0, B20, B40, B60 B80 ve B100 yakıtlarının EGS değerleri sırasıyla; %2,76, %2,79, %0,30, %1,28, %1,76 ve %2,72 oranında azalmıştır. Basıncın azaltılması ile yakıt tanecik boyutu büyümekte, atomizasyon ve buharlaşma kötüleşmektedir. Buna bağlı olarak hava ile ideal bir karışım oluşumu engellenmekte ve yanma sonu sıcaklıklar düşmektedir. Sonuç olarak, püskürtme basıncının STD değerinden daha az olması durumunda EGS değerlerinde azalma görülmektedir. EGS'nin püskürtme basıncına bağlı olarak değişimleriyle ilgili elde edilen sonuçlar literatürdeki birçok çalışma ile benzerlik göstermektedir [124,125].

3.2.3.2. NO emisyonlarının püskürtme basıncına göre değişimi

Şekil 3.20'de NO emisyonlarının püskürtme basıcına göre değişimleri görülmektedir. Motor yükünün artmasıyla birlikte NO emisyonlarının da arttığı görülmektedir. Örneğin, STD püskürtme basıncında B20 yakıtının %25, %50, %75 ve %100 yükteki NO değerleri sırasıyla; 13,55, 18,76 g/kWh, 22,83 g/kWh ve 30,22 g/kWh'tir. Motor yükünün artmasıyla birlikte gönderilen yakıt miktarı artacağından yakıt/hava oranı artacak ve motor daha zengin karışımlarla çalışmaya başlayacaktır. Bu durum, silindir içi sıcaklık ve basınçların yükselmesine ve NO emisyonlarının artışına yol açmaktadır.



Şekil 3. 20. NO emisyonlarının püskürtme basıncına göre değişimi

Karışım içerisindeki biyodizel oranının artması ile NO emisyonlarının azaldığı görülmektedir. Örnek olarak, %50 motor yükünde ve STD püskürtme basıncında B0'ın NO emisyonu 18,76 g/kWh olarak ölçülmüştür. B20, B40, B60, B80 ve B100 yakıtlarının NO emisyonları B0 ile kıyaslandığında sırasıyla; %6,45, %6,96, %3,78, %5,25 ve %4,45 oranında azalmıştır. Biyodizelin ısıl değerinin düşük olması silindir içi sıcaklık ve basıncın düşmesine yol açmaktadır. Bu durum NO oluşumunu azaltmaktadır. Bir başka sebep ise; biyodizelin setan sayısının dizel yakıtından yüksek olması nedeniyle tutuşma gecikmesi süresinin kısalması ve yanmanın daha erken başlamasıdır. Sonuç olarak, silindir içi sıcaklık ve basınçların ani değişimi önlenmekte ve NO emisyonları azalmaktadır. Ayrıca, biyodizelin buharlaşma ısısının dizelden yüksek olması da yanma odasından daha fazla ısı çekilmesine ve yanma sonu sıcaklıkların düşmesine yol açmaktadır.

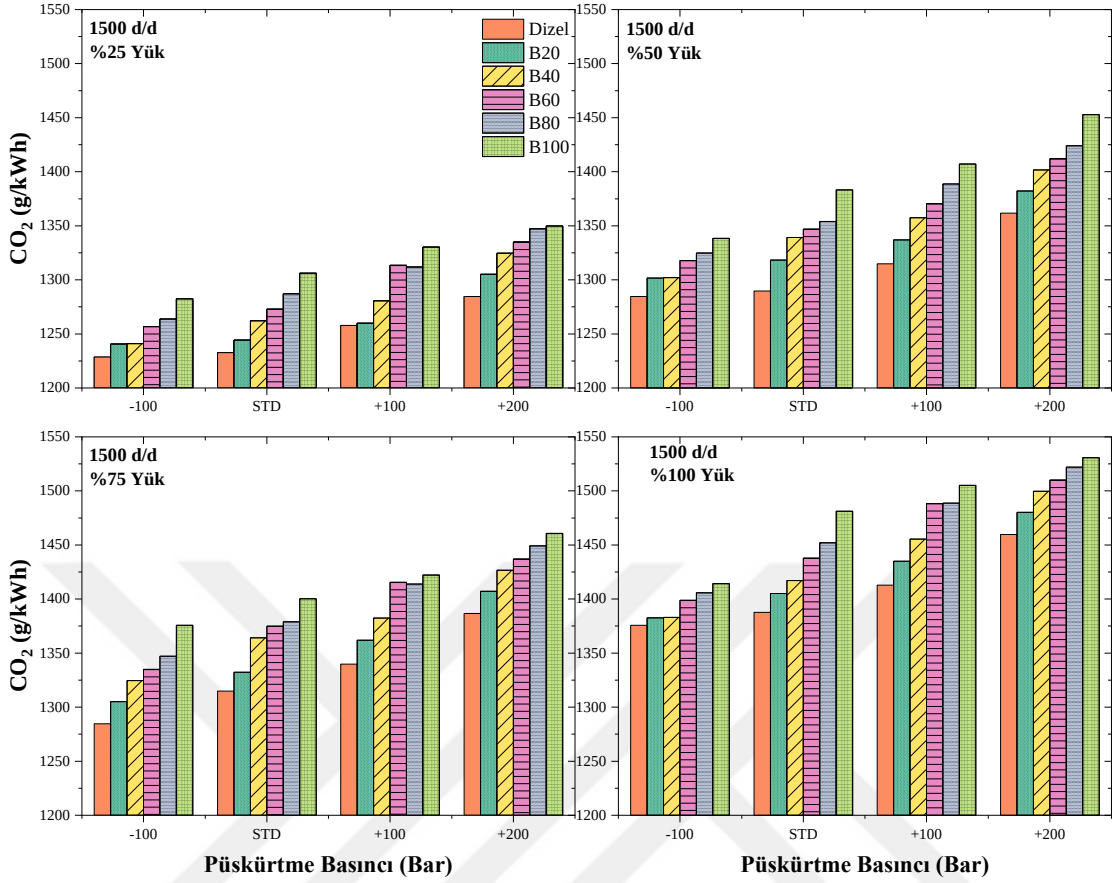
Püskürtme basıncının motorun standart değerinin üzerine çıkarılması durumunda NO emisyonları artmaktadır. Örnek olarak, %75 motor yükünde ve STD püskürtme basıncı

+200 KA olarak değiştirildiğinde B0, B20, B40, B60 B80 ve B100 yakıtlarının NO değerleri sırasıyla; %3,94, %0,38, %1,50, %0,26, %3,53 ve %1,01 oranında artmıştır. Püskürtme basıncının artırılması yakıt damlacık çapını küçültmektedir. Bu sayede yakıtın atomizasyonu, buharlaşması ve hava ile karışımı iyileşmektedir. Bunların sonucunda silindir içi sıcaklıklar artarak NO oluşumunun artmasına yol açmaktadır. Biyodizelin yoğunluğunun ve viskozitesinin yüksek olmasının silindir içinde atomizasyon ve buharlaşmayı olumsuz etkileyerek yanmayı kötüleştirdiği bilinmektedir. Deney yakıtları içerisinde yoğunluğu ve viskozitesi en yüksek olan karışımlar B80 ve B100'dür. Püskürtme basıncının artırılmasıyla birlikte karışım oluşumu ve yanma iyileşmektedir. Bunların sonucunda silindir içi sıcaklıklar yükselmekte ve NO emisyonları artmaktadır.

Püskürtme basıncının motorun orijinal değerine göre azaltılması ile NO emisyonlarının azaldığı görülmüştür. Örneğin, %100 motor yükünde ve püskürtme basıncı -100 bar olarak değiştirildiğinde B0, B20, B40, B60 B80 ve B100 yakıtlarının NO değerleri sırasıyla; %1,45, %3,91, %3,49, %2,52, %1,98 ve %9,65 oranında azalmıştır. Püskürtme basıncının azaltılması yakıt damlacık çapının büyümesine yol açmaktadır. Buna bağlı olarak, yakıtın atomize olması ve buharlaşması daha uzun sürmektedir. Bunların sonucunda tutuşma gecikmesi süresi uzamaktadır. Tutuşma gecikmesi süresinin uzaması ani sıcaklık ve basınç artışlarına engel olmaktadır. Sonuç olarak, yanma sonu sıcaklıklar düşmekte ve NO emisyonları azalmaktadır.

3.2.3.3. CO_2 emisyonlarının püskürtme basıncına göre değişimi

Şekil 3.21'de CO_2 emisyonlarının püskürtme basıncına göre değişimleri görülmektedir. Tüm yakıtlarda motor yükünün artışına bağlı olarak CO_2 emisyonunun arttığı görülmüştür. Örnek olarak, standart püskürtme basıncında B100 yakıtının %25, %50, %75 ve %100 yükteki CO_2 emisyonları sırasıyla; 1222,76 g/kWh, 1289,76 g/kWh, 1314,79 g/kWh ve 1387,14 g/kWh'tir. CO_2 emisyonları stokiyometrik hava yakıt karışımı durumunda maksimum değerine ulaşmaktadır. Motor yükündeki artış ile silindir içerisindeki karışım zenginleşerek stokiyometrik karışıma yaklaşmakta, dolayısıyla da CO_2 emisyonlarında artış olmaktadır.



Şekil 3. 21. CO_2 emisyonlarının püskürtme basıncına göre değişimi

Karışım içerisindeki biyodizel oranının artması ile CO_2 emisyonunun arttığı görülmektedir. Örnek olarak, %50 motor yükünde ve STD püskürtme basıncında yakıtların CO_2 emisyonları sırasıyla; B0 (1289,76 g/kWh), B20 1318,23 g/kWh), B40 (1339,18 g/kWh), B60 (1346,89 g/kWh), B80 (1353,96 g/kWh) ve B100 (1383,17 g/kWh) olarak ölçülmüştür. Biyodizel ve karışımlarının kullanılmasıyla birlikte yanma reaksiyonlarındaki oksijen miktarı artış göstermektedir. Bunun sonucunda tam yanma reaksiyonu olan CO_2 emisyonunun arttığı düşünülmektedir. Tüm deneylerde en düşük CO_2 emisyonu B0 yakıtı ile elde edilirken, en yüksek değer B100 yakıtı ile elde edilmiştir.

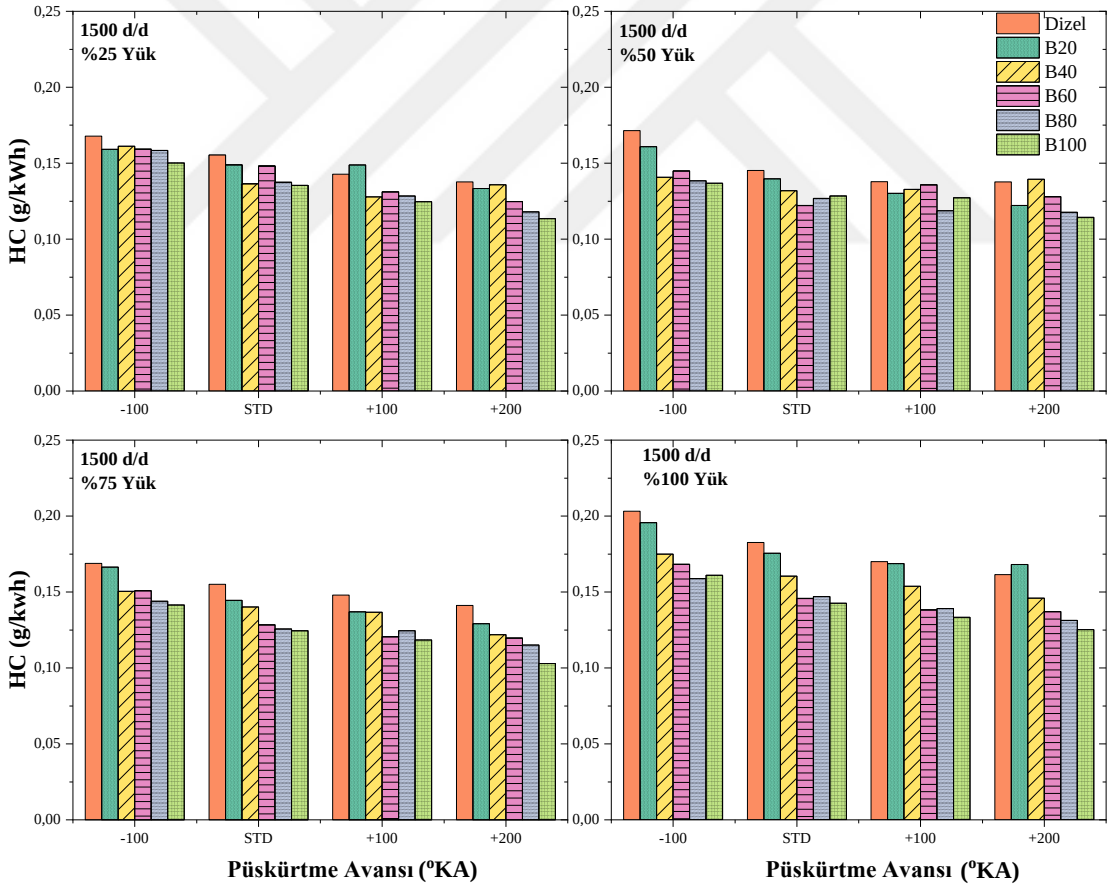
Püskürtme basıncının artırılmasıyla bütün test yakıtlarının CO_2 emisyonları artmış ve +200 bar püskürtme basıncında ise maksimum değerlerine ulaşılmıştır. Örneğin, %75 motor yükünde ve püskürtme basıncı +200 bar'a değiştirildiğinde B0, B20, B40, B60, B80 ve B100 yakıtlarının CO_2 emisyonları sırasıyla; %5,46, %5,62, %4,57, %4,51, %5,08 ve %4,32 oranında artmıştır. Püskürtme basıncının artırılması yakıt damlacık çapının küçülmesine ve hava/yakıt karışımının iyileşmesine yol açar. Buna bağlı olarak tutuşma

gecikmesi süresi azalır ve yanma iyileşir. Bunların sonucunda da tam yanma reaksiyonu olan CO_2 emisyonunun artış gösterdiği düşünülmektedir.

Püskürtme basıncının azaltılması ile CO_2 emisyonlarının azaldığı görülmüştür. Örnek olarak, %100 motor yükünde püskürtme basıncı -100 bar'a değiştirildiğinde B0, B20, B40, B60, B80 ve B100 yakıtlarının CO_2 değerleri sırasıyla; %0,87, %1,61, %2,40, %2,71, %3,18 ve %4,51 oranında azalmıştır. Püskürtme basıncının azaltılması ile yakıt tanecik çapı büyümekte ve atomizasyon kötüleşmektedir. Bununla birlikte, tutuşma gecikmesi süresi artmakta ve yanma verimi düşmektedir. Sonuç olarak püskürtme basıncının azaltılması ile CO_2 emisyonları azalmaktadır.

3.2.3.4. HC emisyonlarının püskürtme basıncına göre değişimi

Şekil 3.22'de HC emisyonlarının püskürtme basıncına bağlı değişimleri görülmektedir.



Şekil 3. 22. HC emisyonlarının püskürtme basıncına göre değişimi

Motor yükünün artmasıyla birlikte HC emisyonları artmıştır. Örneğin, STD püskürtme basıncında B60 yakıtının %25, %50, %75 ve %100 yükte HC emisyonu değerleri sırasıyla; 0,1553 g/kWh, 0,1452 g/kWh, 0,1550 g/kWh ve 0,1826 g/kWh'tir. Motor yükünün artmasıyla HC emisyonlarının artması silindir içerisine gönderilen yakıt miktarının artması ile ilgilidir [128]. Bu yüzden yakıt/hava oranı artarak zengin karışım bölgeleri oluşturmuştur. Bu durum, püskürtülen yakıtın silindir cidarlarına kadar ilerlemesine sebep olmakta ve yakıt hüzmesinin çekirdeğindeki yakıt konsantrasyonunu daha fazla artırmaktadır. Bu doğrultuda yapılan testlerde, artan motor yüküyle birlikte HC emisyonları da artmaktadır.

Genel olarak karışım içerisindeki biyodizel oranının artması ile HC emisyonlarının azaldığı görülmektedir. Örnek olarak, %50 motor yükünde ve motorun orijinal püskürtme avansında yapılan deneylerde yakıtların HC emisyonları B0 ile kıyaslandığında; %3,84 (B20), %9,19 (B40), %15,85 (B60), %12,66 (B80) ve %11,63 (B100) oranında azalmıştır. Biyodizelin içeriğinde bulunan oksijen, artan sıcaklıklarla beraber zengin hava-yakıt karışım bölgelerinde oksidasyon hızlarını arttırır. Böylece HC emisyonlarında azalma görülür. Biyodizelin bünyesinde daha az karbon barındırması da HC emisyonlarının oluşumunu azaltmaktadır. Ayrıca, biyodizelin setan sayısının dizelden yüksek olması sebebiyle tutuşma gecikmesi süresi dizelden kısadır. Bu durum, yanma süresinin uzamasına yol açmıştır [12]. Sonuç olarak, biyodizel ve karışımlarının kullanımı ile HC emisyonlarında bir azalma meydana gelmiştir.

Püskürtme basıncının arttırılması ile genel olarak HC emisyonunun azaldığı görülmüştür. Örnek olarak, %75 motor yükünde ve püskürtme basıncı +200 bar'a değiştirildiğinde HC değerleri %8,94 (B0), %10,55 (B20), %13,04 (B40), %6,81 (B60), %8,42 (B80) ve %17,31 (B100) oranında azalmıştır. Orta ve yüksek motor yüklerinde enjeksiyon basıncının standart değere göre 100 bar arttırılması, özellikle karışım içerisindeki biyodizel oranı yüksek olan yakıtlarda oldukça olumlu bir etki yapmıştır [71,126]. Bu yakıtların yoğunluk ve viskozitelerinin yüksek olmasından kaynaklanan olumsuzlukları en aza indirerek HC emisyonlarında düşüşe yol açmıştır. Benzer durum +200 bar püskürtme basıncı ile yapılan testlerde de görülmüştür. Genel olarak, püskürtme basıncının artırılması yakıtın enjektörlerden çıkış hızını artırmakta ve yakıt damlacık çapını küçültmektedir. Bu durum, yakıtın daha iyi buharlaşmasına ve karışımın homojen

olmasına katkı sağlamaktadır. Sonuç olarak, basıncın artırılmasıyla yanma veriminin arttığı ve HC emisyonlarının azaldığı düşünülmektedir.

Püskürtme basıncının azaltılması ile HC emisyonlarının arttığı görülmüştür. Örneğin, %100 motor yükünde ve püskürtme basıncı -100 bar'a değiştirildiğinde B0, B20, B40, B60 B80 ve B100 yakıtlarının HC değerleri sırasıyla; %11,25, %11,48, %9,02, %15,40, %8,10 ve %12,91 oranında artmıştır. Püskürtme basıncının azaltılması yakıt tanecik çapının büyümesine ve atalet kuvvetlerinin artmasına sebep olmaktadır. Ataletleri artan yakıt tanecikleri piton-segman boşluklarına ve silindir cidarlarına daha kolay ulaşabilmektedir. Piston-segman boşluklarının alev sönme bölgesinde olmasından dolayı, bu bölgelerde yanmamış hidrokarbonlar artmaktadır. Ayrıca, silindir cidarlarına yapışan yakıtlar, yeterli tutuşma sıcaklığına ulaşamadığından dolayı yanmadan silindir dışına atılmaktadır. Sonuç olarak, basıncın azaltılmasıyla yanma verimi düşer ve HC emisyonları artar.

3.4. Motor Deneylerinin Standart Sapma Sonuçları

Gerçekleştirilen deneylerde elde edilen sonuçlarda hata payını en aza indirmek ve sonuçları doğrulamak için deneyler üç defa tekrar edilmiştir. Yapılan hesaplamalar sonucunda her bir yakıt ile gerçekleştirilen tüm deneyler için standart sapma değerleri hesaplanmış ve Ek 1- Tablo 1, Ek 1- Tablo 2, Ek 1- Tablo 3, Ek 1- Tablo 4, Ek 1- Tablo 5 ve Ek 1- Tablo 6 olarak Ekler bölümünde sunulmuştur.

4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışma; biyodizel üretimi ve motor testleri olmak üzere iki farklı bölümden oluşmaktadır. Üretim aşamasında, SYA'sı yüksek olan atık zeytinyağı kullanılarak biyodizel üretilmiştir. Bu kısım da kendi içinde iki farklı bölümden oluşmaktadır. Birinci bölüm SYA'sı yüksek ve biyodizel üretimine uygun olmayan zeytinyağının, ön iyileştirme (esterleştirme) ile üretim için uygun hale getirilmiştir. Bu işlemde, zaman tasarrufu sağlamak ve kimyasal (metanol ve sülfirik asit) tüketimini azaltmak için Taguchi L16(4^2 2^1) deney tasarımı kullanılarak optimizasyon yapılmıştır. İkinci bölümde ise transesterifikasyon ile biyodizel üretimi üç farklı yöntem (klasik ısıtma, ultrasonik banyo ve ultrasonik homojenizatör) kullanılarak yapılmıştır. Bu sayede; zaman, enerji, metanol ve katalizör kullanımı açısından en uygun biyodizel üretim yöntemi belirlenerek motor testleri için gerekli olan yakıt üretilmiştir.

İkinci kısımda, üretilen biyodizel saf halde ve dizel ile dört farklı hacimsel oranda (%20, %40, %60 ve %80) harmanlanarak B0, B20, B40, B60, B80 ve B100 karışımları oluşturulmuştur. Deneylerde; tek silindirli, 1,12 litre hacimli, common rail yüksek basınçlı enjeksiyon sistemli ve ön püskürtmeli dizel bir motor kullanılmıştır. Motor testleri 1500 d/d sabit motor hızında ve dört farklı motor yükünde (%25, %50, %75 ve %100) gerçekleştirilmiştir. Her bir yakıt, dört farklı püskürtme basıncı (-100, STD, +100 ve +200 bar) ve dört farklı püskürtme avansında (-2, STD, +2 ve +4 ^{o}KA) test edilmiştir. Deneyler sonucunda biyodizel ve karışımlarının performans, yanma ve egzoz emisyonu sonuçları dizel yakıtı ile kıyaslanmış ve aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

Biyodizel üretimi ile ilgili başlıca sonuçlar aşağıda verilmiştir:

- Ön iyileştirme işleminde optimum metanol oranı, katalizör oranı ve karıştırma hızını bulmak için 256 adet deney yapılması gerekmektedir. Esterifikasyon işleminde Taguchi deney tasarımı metodu kullanılarak deney sayısı 16'ya indirgenmiştir. Buna göre, %20 sülfürik asit (SYA içeriğine göre), 22:1 metanol/yağ molar oranı ve 400 d/d karıştırma hızının en uygun deney şartları olduğu tespit edilmiştir.
- Biyodizel üretiminde transesterifikasyon işlemi; klasik ısıtıcılı ve karıştırıcılı, ultrasonik banyo ve ultrasonik homojenizatör ile gerçekleştirilmiştir. Bu üç

yöntem içerisinde en yüksek biyodizel dönüşüm verimine (%98,7) ultrasonik homojenizatör ile yapılan deneyde ulaşılmıştır.

- Biyodizel üretimi klasik ısıtma ile ortalama 60 dakikada yapılırken, ultrasonik homojenizatör ile bu süre 10 dakikaya indirgenmiştir. Bu sayede, diğer yöntemlere göre zaman ve enerji tasarrufu sağlanmıştır.

Motor performansı ile ilgili başlıca sonuçlar aşağıda verilmiştir:

- Motor yükünün artmasıyla birlikte tüm yakıtların efektif verimi orantılı olarak artmıştır.
- Genel olarak karışım içerisindeki biyodizel oranının artması ile efektif verim azalmıştır. Dizel yakıtına %40'a kadar biyodizel ilavesi efektif verimi iyileştirmiştir. Ancak, biyodizel oranının daha da artırılması efektif verimde düşüşe sebep olmuştur.
- Püskürtme avansının azaltılması efektif verimde düşüşlere sebep olmuştur. Avansın artırılması ise efektif verimi artırmıştır.
- Püskürtme basıncının arttırılması ile efektif verim artmıştır. Fakat, basıncın azaltılması hemen hemen bütün yakıtlarda efektif verimin düşmesine sebep olmuştur.
- Tüm yakıtlarda motor yükünün artırılmasıyla doğru orantılı olarak ÖYT azalmıştır.
- Karışım içerisindeki biyodizel oranının artması ÖYT'de artışa sebep olmuştur. Gerçekleştirilen tüm deneylerde en düşük ÖYT'nin dizel yakıtı ile elde edildiği görülmüştür.
- Püskürtme avansının artırılmasıyla ÖYT'de düşüş gerçekleşmiştir. Özellikle +4 ^{o}KA püskürtme avansında yapılan testlerde daha olumlu sonuçlar elde edilmiştir. Avansın azaltılmasında ise genel olarak yakıtların ÖYT'leri artmıştır. Ancak, B80 ve B100 yakıtları, avansın azaltılmasında oransal olarak en az ÖYT artışı gerçekleştiren yakıtlar olmuştur.
- Püskürtme basıncının artırılması ile ÖYT'de düşüş gerçekleşmiştir. Basıncın azaltılması ise deney yakıtlarının ÖYT'lerinde nispeten artışa sebep olmuştur.

Egzoz emisyonları ile ilgili başlıca sonuçlar aşağıda verilmiştir:

- Bütün deney yakıtlarında motor yükünün artması EGS'de artışa sebep olmuştur. Düşük motor yüklerinde her bir çevrim için silindirlere gönderilen yakıt miktarları birbirine yakın olduğundan yakıtların EGS'leri arasında çok fazla fark oluşmamıştır.
- Karışım içerisindeki biyodizel oranının artmasıyla birlikte EGS'lerin düştüğü görülmüştür.
- Püskürtme avansının artırılmasıyla EGS değerlerinde artış görülmüştür. Avansın azaltılması durumda ise EGS değerleri azalmıştır.
- Püskürtme basıncının artırılması EGS değerlerinin artışına yol açmıştır. Enjeksiyon basıncının azaltılması durumunda ise EGS değerleri azalmıştır.
- Motor yükünün artmasıyla birlikte tüm yakıtlarda NO emisyonları artmıştır.
- Karışım içerisindeki biyodizel oranının artışı NO oluşumunu azaltmıştır.
- Püskürtme avansının azaltılması ile NO emisyonlarında azalma görülmüştür. Avansın artırılması durumunda ise NO emisyonlarında artış gerçekleşmiştir.
- Püskürtme basıncının arttırılmasıyla NO oluşumunda artış gözlemlenmiştir. Basıncın azaltılması ise NO emisyonlarında düşüşe yol açmıştır.
- Genel olarak, tüm deneylerde en yüksek CO_2 miktarı dizelde oluşmuştur. Biyodizel ve karışımlarının CO_2 seviyeleri dizelden düşüktür.
- Püskürtme avansının azaltılması ile CO_2 emisyonları azalmıştır. Avansın arttırılması durumunda ise CO_2 oluşumunda artış gözlenmemiştir.
- Püskürtme basıncının artırılması, özellikle yoğunluğu ve viskozitesi yüksek olan yakıtlarda CO_2 emisyonunu artmıştır. Basıncın azaltılması ile tam tersi bir oluşum gerçekleşmiş ve CO_2 miktarı azalmıştır.
- Bütün deneyler içerisinde en yüksek HC oluşumu %100 motor yüklerinde yapılan deneylerde elde edilmiştir.
- Karışım içerisindeki biyodizel oranının artışı ile HC emisyonları azalmıştır. Deneylerde en düşük HC oluşumları B100 yakıtı ile gerçekleşmiştir.
- Püskürtme avansının azaltılması ile HC emisyonlarında artış görülmüştür. Püskürtme avansının arttırılmasıyla birlikte HC emisyonlarında düşüş

gözlemlenmiş ve en düşük HC seviyeleri +4 ^{o}KA püskürtme avansında yapılan deneylerde elde edilmiştir.

- Püskürtme basıncının artırılması, tüm yakıtlarda yakıtın atomizasyonunu iyileştirmiş ve ideal bir yanmaya olanak sağlamıştır. Basıncın artırılması tüm yakıtlarda olumlu bir etki yaparak HC oluşumunu düşürmüştür. Özellikle B60, B80 ve B100 yakıtlarında bu etki daha belirgin şekilde görülmektedir. Püskürtme basıncının azaltılması ile HC emisyonlarında artış gerçekleşmiştir.

Yanma analizleri ile ilgili başlıca sonuçlar aşağıda verilmiştir:

- Biyodizel kullanımıyla birlikte silindir gaz basınçlarının nispeten azaldığı ve konumunun ÜÖN'den uzaklaştığı görülmüştür.
- Püskürtmenin öne alınması, yakıtların yanması için gerekli olan zamanı azalttığından maksimum silindir gaz basıncı daha geç oluşmuştur. Biyodizelin püskürtme ve yanma başlangıcı dizelden daha önce gerçekleşmektedir. Böylelikle, avansın azaltılmasıyla ÜÖN'den en az uzaklaşan yakıtlar B80 ve B100 olmuştur. Püskürtme avansının artırılması ile tüm yakıtların maksimum silindir gaz basınç değerleri azalmış ve maksimum basıncın oluşma noktası ÜÖN'ye yaklaşmıştır.
- Tüm yakıtların silindir gaz basınç eğrilerinin birbirine benzer olması ve aradaki farkların çok az olması; biyodizellerin sıkıştırma ile ateşlemeli motorlarda herhangi bir yapısal değişiklik yapılmadan kullanılabileceğini göstermektedir. Ayrıca, yüksek basınçlı enjeksiyon sistemi ve pilot enjeksiyon gibi özellikler biyodizellerin yoğunluk ve viskozitedeki dezavantajlarını tolere etmektedir. Sonuç olarak, tüm yakıtların maksimum silindir gaz basınçları birbirlerine yakın değerlerde olmuştur.
- Püskürtme basıncının artırılması ile B80 ve B100 yakıtlarının maksimum silindir gaz basınçları artmıştır. Ayrıca, artan enjeksiyon basıncı ile tüm yakıtların maksimum silindir gaz basıncının konumu ÜÖN'ye yaklaşmıştır. Basıncın azaltılması ile, tüm yakıtların maksimum silindir gaz basınç değerleri azalmış ve konumu ÜÖN'den uzaklaşmıştır. Bu durum, yakıt damlacık çapının artması, buharlaşma ve hava/yakıt karışımının kötüleşmesi ile ilgilidir.

- Motor yükünün artması, silindire gönderilen yakıt miktarını artırmaktadır. Buna bağlı olarak deneylerde ısı açığa çıkışı ve silindir gaz basıncı artmıştır.
- STD püskürtme avanslarında yapılan deneylerde genel olarak dizelin ısı açığa çıkışının biyodizel içeren yakıtlardan daha erken olduğu görülmüştür. Avansın öne alınarak -2 ^{o}KA'da püskürtme yapılmasıyla tüm yakıtların ısı açığa çıkış noktaları ÜÖN'ye yaklaşmıştır. Avansın artırılması durumunda ise biyodizel içeren yakıtların ısı başlangıçları dizelden daha erken olmuştur. Biyodizelin oksijen içermesi sayesinde yanma hızının arttığı, tutuşma ve yanma safhalarının hızlı bir şekilde gerçekleştiği söylenebilir.
- Enjeksiyon basıncının artırılmasıyla biyodizel içeren yakıtların ısı açığa çıkışının dizelden daha erken olduğu görülmüştür. Bu durum, biyodizelin uçuculuk değerinin dizelden yüksek olmasından kaynaklanmaktadır. Uçuculuğu yüksek yakıtlar, tutuşma başlangıcının gecikmesine ve ısı açığa çıkışının daha erken gerçekleşmesine yol açmaktadır.
- Gerçekleştirilen deneylerde ana enjeksiyondan 4-8 ^{o}KA önce ön püskürtme yapılmıştır. Ancak, ön püskürtmede enjekte edilen yakıt toplam yakıt miktarının %3-%5'i arasındadır. Bu yüzden pilot enjeksiyonun ısı dağılımı grafiklerinde etkisi oldukça sınırlı kalmıştır.

Gerçekleştirilen deneyler sonucu elde edilen deneyimler ışığında, sonraki çalışmalara yol göstermesi açısından aşağıdaki öneriler değerlendirilebilir.

- SYA'sı yüksek olan yağların biyodizel üretimine uygun hale getirilmesinde esterifikasyon işleminin asit katalizör ve alkol yerine sadece bazik katalizör ile yapılması; bu işlem sonucunda oluşan sabunun ayrıştırılarak kalan yağın biyodizel üretiminde kullanılması araştırılabilir.
- Biyodizel üretiminde sulu yıkama işleminin en büyük dezavantajı biyodizel içerisinde su bulunmasıdır. Bu durum, ekstra iş yükü ve maliyet ortaya çıkarmaktadır. Magnezyum silikat ve benzeri absorban maddeler ile kuru yıkama işlemi yapılarak daha saf biyodizel üretilebilir. Ayrıca, zaman ve maliyet açısından tasarruf sağlayacağı görülmektedir.

- Biyodizel üretiminde ultrasonik destekli üretim ve mikrodalga destekli üretim yöntemleri kıyaslanarak alkol ve katalizör miktarının düşürülmesi hem çevresel hem de ekonomik açıdan önemli bir katkı sunacaktır.
- Ultrasonik destekli biyodizel üretimi için otomatik ya da yarı otomatik bir reaktör geliştirilerek, üretimin daha büyük hacimlerde yapılması; biyodizel üretiminde ciddi bir zaman ve maliyet tasarrufu sağlayabileceği ön görülmektedir.
- Biyoyakıtlar ile yapılan çalışmalarda yakıt üretimi ve motor testlerinin gerçekleştirilmesi önemli bir maliyet ve zaman gerektirmektedir. Bu çalışmadaki deneysel parametreleri kullanılarak matematiksel bir modelleme oluşturulabilir..
- Daha sonraki çalışmalarda test motorunun EGR ve SCR ile çalıştırılarak motor performansı ve emisyon değişimleri incelenebilir.
- Gelecek çalışmalarda motor yüklerinin tamamında kıyaslama yapabilecek yapay sinir ağları ile bir sistem tasarlanarak %1-100 motor yükü arasındaki tüm değerlerde kıyaslama yapmak, optimum yakıt karışımlarının bulunmasında önemli bir fayda sağlayacaktır.
- Püskürtme avansı ile yapılacak gelecek çalışmalarda motor kademeli enjeksiyon ile çalıştırılarak motor performansı, yanma analizleri ve egzoz emisyonları üzerindeki etkilerinin incelenmesi süreçteki araştırmalara ışık tutacaktır.

KAYNAKLAR

[**1**] Çanakçı, M., Özsezen, A.N. (2004) Dizel motorları yardımcı ekipmanlarındaki Gelişmeler. Mühendis ve Makine, 45, (530), 37–42.

[**2**] Yaşar, F. (2016) Yosun yağından biyodizel üretimi ve bir dizel motorunda alternatif yakıt olarak kullanılması. Doktora Tezi, Batman Üniversitesi Fen Bilimleri Ensititüsü, Batman, Türkiye, 149 s.

[**3**] Kumar, M.S., Kerihuel, A., Bellettre, J., Tazerout, M. (2006) Ethanol animal fat emulsions as a diesel engine fuel - Part 2 Engine test analysis. Fuel, 85, (17–18),.

[**4**] Altun, Ş. (2009) Hayvansal yağlardan biyo-yakıt üretimi ve bir dizel motorunda kullanılabilirliğinin deneysel araştırılması. Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, Türkiye, 133.

[**5**] Lee, C.S., Park, S.W., Kwon, S. Il (2005) An experimental study on the atomization and combustion characteristics of biodiesel-blended fuels. Energy and Fuels, 19, (5), 2201-2208.

[**6**] Alptekin, E., Çanakçı, M. (2006) Biyodizel ve Türkiye'deki durumu. Mühendis ve Makine, 47, (561), 57–64.

[**7**] Canakci, M. (2007) Combustion characteristics of a turbocharged DI compression ignition engine fueled with petroleum diesel fuels and biodiesel. Bioresource Technology, 98, (6), 1167-1175.

[**8**] Altun, Ş., Yaşar, F. (2013) Biodiesel production from leather industry wastes as an alternative feedstock and its use in diesel engines. Energy Exploration and Exploitation, 31, (5), 759-770.

[**9**] Meng, X., Chen, G., Wang, Y. (2008) Biodiesel production from waste cooking oil via alkali catalyst and its engine test. Fuel Processing Technology, 89, (9), 851-857.

[**10**] Kegl, B. (2007) NOx and particulate matter (PM) emissions reduction potential by biodiesel usage. Energy and Fuels, 21, (6), 3310-3316.

[11] TÜİK, Türkiye İstatistik Kurumu. Bitkisel Üretim İstatistikleri, Zeytin Üretimi, https://data.tuik.gov.tr/Kategori/GetKategori?p=tarim-111&dil=1, 03 şubat 2022.

[**12**] Özsezen, A.N. (2007) Atık Palmiye Yağından Üretilen Biyodielin Motor Performans ve Emisyon Karakteristikleri Üzerine Etkisinin İncelenmesi. Doktora Tezi, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, Türkiye, 67-125.

[**13**] Ideris, F., Shamsuddin, A.H., Nomanbhay, S., Kusumo, F., Silitonga, A.S., Ong, M.Y., Ong, H.C., Mahlia, T.M.I. (2021) Optimization of ultrasound-assisted oil extraction from Canarium odontophyllum kernel as a novel biodiesel feedstock. Journal of Cleaner Production, 288, 125563.

[**14**] Yasvanthrajan, N., Sivakumar, P., Muthukumar, K., Murugesan, T., Arunagiri, A. (2020) Production of biodiesel from waste bio-oil through ultrasound assisted transesterification using immobilized lipase. Environmental Technology and Innovation, 21, 101199.

[**15**] Bundhoo, Z.M.A., Mohee, R. (2018) Ultrasound-assisted biological conversion of biomass and waste materials to biofuels A review. Ultrasonics Sonochemistry, 40, 298–313.

[**16**] Kusumo, F., Shamsuddin, A.H., Ahmad, A.R., Dharma, S., Milano, J., Silitonga, A.S., Fazril, I., Marzuki, H., Akhiar, A., Sebayang, R., Tambunan, B.H. (2020) Production of biodiesel from Jatropha curcas mixed with waste cooking oil assisted by ultrasound. IOP Conference Series Earth and Environmental Science, 476, 12082.

[**17**] Mujtaba, M.A., Masjuki, H.H., Kalam, M.A., Ong, H.C., Gul, M., Farooq, M., Soudagar, M.E.M., Ahmed, W., Harith, M.H., Yusoff, M.N.A.M. (2020) Ultrasound-assisted process optimization and tribological characteristics of biodiesel from palm-sesame oil via response surface methodology and extreme learning machine - Cuckoo search. Renewable Energy, 158, 202–214.

[**18**] Aghbashlo, M., Tabatabaei, M., Amid, S., Hosseinzadeh-Bandbafha, H., Khoshnevisan, B., Kianian, G. (2020) Life cycle assessment analysis of an ultrasound-assisted system converting waste cooking oil into biodiesel. Renewable Energy, 151, 1352–1364.

[**19**] Almasi, S., Ghobadian, B., Najafi, G., Dehghani Soufi, M. (2021) A novel approach for bio-lubricant production from rapeseed oil-based biodiesel using ultrasound irradiation Multi-objective optimization. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 43, 100960.

[**20**] Sharma, A., Kodgire, P., Kachhwaha, S.S. (2020) Investigation of ultrasound-assisted KOH and CaO catalyzed transesterification for biodiesel production from waste cotton-seed cooking oil Process optimization and conversion rate evaluation. Journal of Cleaner Production, 259, 120982.

[**21**] Sivaramakrishnan, R., Incharoensakdi, A. (2018) Microalgae as feedstock for biodiesel production under ultrasound treatment – A review. Bioresour Technol, 250, 877-887.

[**22**] Selvakumar, P., Sivashanmugam, P. (2019) Ultrasound assisted oleaginous yeast lipid extraction and garbage lipase catalyzed transesterification for enhanced biodiesel production. Energy Conversion and Management, 179, (4), 141–151.

[**23**] Carmona-Cabello, M., Sáez-Bastante, J., Pinzi, S., Dorado, M.P. (2019) Optimization of solid food waste oil biodiesel by ultrasound-assisted transesterification. Fuel, 255, 115817.

[**24**] Bahadur, S., Goyal, P., Sudhakar, K., Bijarniya, J.P. (2015) A comparative study of ultrasonic and conventional methods of biodiesel production from mahua oil. Biofuels, 6, (1–2), 107–113.

[**25**] Aparamarta, H.W., Gunawan, S., Husin, H., Azhar, B., Tri Aditya, H. (2020) The effect of high oleic and linoleic fatty acid composition for quality and economical of biodiesel from crude Calophyllum inophyllum oil (CCIO) with microwave-assisted extraction (MAE), batchwise solvent extraction (BSE), and combination of MAE–BSE methods. Energy Reports, 6, 3240–3248.

[**26**] Yan, J., Zhao, Y., Li, K., Zhang, H., Fan, L., Lu, Z. (2020) Efficient production of biodiesel from ionic liquid catalyzed esterification using ultrasonic-microwave combined intensification. Chemical Engineering and Processing - Process Intensification, 149, 107870.

[**27**] Hsiao, M.C., Kuo, J.Y., Hsieh, S.A., Hsieh, P.H., Hou, S.S. (2020) Optimized conversion of waste cooking oil to biodiesel using modified calcium oxide as catalyst via a microwave heating system. Fuel, 266, 117114.

[**28**] Allami, H.A., Tabasizadeh, M., Rohani, A., Farzad, A., Nayebzadeh, H. (2019) Precise evaluation the effect of microwave irradiation on the properties of palm kernel oil biodiesel used in a diesel engine. Journal of Cleaner Production, 241, 117777.

[**29**] Sharma, A., Kodgire, P., Kachhwaha, S.S. (2019) Biodiesel production from waste cotton-seed cooking oil using microwave-assisted transesterification Optimization and kinetic modeling. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 116, 109394.

[**30**] Silitonga, A.S., Shamsuddin, A.H., Mahlia, T.M.I., Milano, J., Kusumo, F., Siswantoro, J., Dharma, S., Sebayang, A.H., Masjuki, H.H., Ong, H.C. (2020) Biodiesel synthesis from Ceiba pentandra oil by microwave irradiation-assisted transesterification ELM modeling and optimization. Renewable Energy, 146, 1278–1291.

[**31**] Lawan, I., Garba, Z.N., Zhou, W., Zhang, M., Yuan, Z. (2020) Synergies between the microwave reactor and CaO/zeolite catalyst in waste lard biodiesel production. Renewable Energy, 145, 2550–2560.

[**32**] Milano, J., Ong, H.C., Masjuki, H.H., Silitonga, A.S., Chen, W.H., Kusumo, F., Dharma, S., Sebayang, A.H. (2018) Optimization of biodiesel production by microwave irradiation-assisted transesterification for waste cooking oil-Calophyllum inophyllum oil via response surface methodology. Energy Conversion and Management, 158, 400–415.

[**33**] Zhang, L., Loh, K.C., Kuroki, A., Dai, Y., Tong, Y.W. (2021) Microbial biodiesel production from industrial organic wastes by oleaginous microorganisms Current status and prospects. Journal of Hazardous Materials, 402, 123543.

[**34**] Ewunie, G.A., Morken, J., Lekang, O.I., Yigezu, Z.D. (2020) Factors affecting the potential of Jatropha curcas for sustainable biodiesel production. A critical review, 137, 110500.

[**35**] Alptekin, E., Canakci, M., Sanli, H. (2014) Biodiesel production from vegetable oil and waste animal fats in a pilot plant. Waste Management, 34, (11), 2146–2154.

[**36**] Alptekin, E. (2013) Hayvansal Atık Yağlardan Biyodizel Üretimi Ve Bir Dizel Motorda Kullanımının İncelenmesi, Doktora Tezi. Kocaeli Üniversitesi,Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, Türkiye, 54-63.

[**37**] Dias, J.M., Alvim-Ferraz, M.C.M., Almeida, M.F. (2009) Production of biodiesel from acid waste lard. Bioresource Technology, 100, (24), 6355–6361.

[**38**] Ramadhas, A.S., Jayaraj, S., Muraleedharan, C. (2005) Biodiesel production from high FFA rubber seed oil. Fuel, 84, (4), 335–340.

[**39**] Dhar, A., Kevin, R., Agarwal, A.K. (2012) Production of biodiesel from high-FFA neem oil and its performance, emission and combustion characterization in a single cylinder DICI engine. Fuel Processing Technology, 97, 118–129.

[**40**] Fadhil, A.B., Aziz, A.M., Al-Tamer, M.H. (2016) Biodiesel production from Silybum marianum L. seed oil with high FFA content using sulfonated carbon catalyst for esterification and base catalyst for transesterification. Energy Conversion and Management, 108, 255–265.

[**41**] Elgharbawy, A.S., Sadik, W.A., Sadek, O.M., Kasaby, M.A. (2021) Glycerolysis treatment to enhance biodiesel production from low-quality feedstocks. Fuel, 284, 118970.

[**42**] Tu, Q., Lu, M., Knothe, G. (2017) Glycerolysis with crude glycerin as an alternative pretreatment for biodiesel production from grease trap waste Parametric study and energy analysis. Journal of Cleaner Production, 162, 504–511.

[**43**] Idowu, I., Pedrola, M.O., Wylie, S., Teng, K.H., Kot, P., Phipps, D., Shaw, A. (2019) Improving biodiesel yield of animal waste fats by combination of a pre-treatment technique and microwave technology. Renewable Energy, 142, 535–542.

[**44**] Hayyan, A., Alam, M.Z., Mirghani, M.E.S., Kabbashi, N.A., Hakimi, N.I.N.M., Siran, Y.M., Tahiruddin, S. (2010) Sludge palm oil as a renewable raw material for biodiesel production by two-step processes. Bioresource Technology, 101, (20), 7804–7811.

[**45**] Chai, M., Tu, Q., Lu, M., Yang, Y.J. (2014) Esterification pretreatment of free fatty acid in biodiesel production, from laboratory to industry. Fuel Processing Technology, 125, 106–113.

[**46**] Pastore, C., Lopez, A., Mascolo, G. (2014) Efficient conversion of brown grease produced by municipal wastewater treatment plant into biofuel using aluminium chloride hexahydrate under very mild conditions. Bioresource Technology, 155, 91–97.

[**47**] Tang, Z.E., Lim, S., Pang, Y.L., Shuit, S.H., Ong, H.C. (2020) Utilisation of biomass wastes based activated carbon supported heterogeneous acid catalyst for biodiesel production. Renewable Energy, 158, 91–102.

[**48**] Al-Sakkari, E.G., Abdeldayem, O.M., El-Sheltawy, S.T., Abadir, M.F., Soliman, A., Rene, E.R., Ismail, I. (2020) Esterification of high FFA content waste cooking oil through different techniques including the utilization of cement kiln dust as a heterogeneous catalyst A comparative study. Fuel, 279, 118519.

[**49**] Muanruksa, P., Kaewkannetra, P. (2020) Combination of fatty acids extraction and enzymatic esterification for biodiesel production using sludge palm oil as a low-cost substrate. Renewable Energy, 146, 901–906.

[**50**] Al-Saadi, A., Mathan, B., He, Y. (2020) Biodiesel production via simultaneous transesterification and esterification reactions over SrO–ZnO/Al2O3 as a bifunctional catalyst using high acidic waste cooking oil. Chemical Engineering Research and Design, 162, 238–248.

[**51**] Söyler, H., Balki, M.K., Sayin, C. (2021) Determination of optimum parameters for esterification in high free fatty acid olive oil and ultrasound-assisted biodiesel production. Biomass Conversion and Biorefinery,.

[**52**] Kadapure, S.A., Kiran, A., Anant, J., Dayanand, N., Rahul, P., Poonam, K. (2017) Optimization of conversion of Pongamia pinnata oil with high FFA to biodiesel using novel deep eutectic solvent. Journal of Environmental Chemical Engineering, 5, (6), 5331–5336.

[**53**] Motasemi, F., Ani, F.N. (2012) A review on microwave-assisted production of biodiesel. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 16, 4719-4733.

[**54**] Choedkiatsakul, I., Ngaosuwan, K., Assabumrungrat, S., Mantegna, S., Cravotto, G. (2015) Biodiesel production in a novel continuous flow microwave reactor. Renewable Energy, 83, 25-29.

[**55**] Tangy, A., Pulidindi, I.N., Perkas, N., Gedanken, A. (2017) Continuous flow through a microwave oven for the large-scale production of biodiesel from waste cooking oil. Bioresource Technology, 224, 333–341.

[**56**] Azcan, N., Yilmaz, O. (2013) Microwave assisted transesterification of waste frying oil and concentrate methyl ester content of biodiesel by molecular distillation. Fuel, 104, 614-619.

[**57**] Lin, J.J., Chen, Y.W. (2017) Production of biodiesel by transesterification of Jatropha oil with microwave heating. Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers, 75, 43-50.

[**58**] El Sherbiny, S.A., Refaat, A.A., El Sheltawy, S.T. (2010) Production of biodiesel using the microwave technique. Journal of Advanced Research, 1, (4), 309-314.

[**59**] Kumar, D., Kumar, G., Poonam, Singh, C.P. (2010) Fast, easy ethanolysis of coconut oil for biodiesel production assisted by ultrasonication. Ultrasonics Sonochemistry, 17, (3), 555-559.

[**60**] Topare, N.S., Patil, K.D. (2021) Biodiesel from waste cooking soybean oil under ultrasonication as an alternative fuel for diesel engine. Materials Today Proceedings, 43, 510–513.

[**61**] Meza-Ramírez, D.B., Hernández-Benítez, C., Contreras-Arias, A., Godínez, L.A., Rodríguez-Valadez, F.J. (2021) Optimization of an ultrasonic reactor on a semi-pilot scale for biodiesel production. Fuel, 288, 119645.

[**62**] Gholami, A., Pourfayaz, F., Maleki, A. (2021) Techno-economic assessment of biodiesel production from canola oil through ultrasonic cavitation. Energy Reports, 7, 266–277.

[**63**] Topal, S. (2014) Atık Kızartma Yağından Ultrasonik Yöntemle Biyodizel Üretimi Ve Kullanımı. Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük, Türkiye.

[**64**] Dehghan, L., Golmakani, M.T., Hosseini, S.M.H. (2019) Optimization of microwave-assisted accelerated transesterification of inedible olive oil for biodiesel production. Renewable Energy, 138, 915–922.

[**65**] Dorado, M.P., Ballesteros, E., Arnal, J.M., Gómez, J., López, F.J. (2003) Exhaust emissions from a Diesel engine fueled with transesterified waste olive oil. Fuel, 82(11) 1311-1315.

[**66**] Peker, A.S. (2009) Gıda niteliği omayan zeytinyağından elde edilen biyodizelin ve karışımlarının yakıt özelliklerinin incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, Türkiye, 53-65.

[**67**] Akay, F. (2017) Atik Zeytinyağindan Elde Edilen Biyodizelin Motor Performansi Ve Egzoz Emisyonlarina Etkileri. Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyon, Türkiye, 1-73.

[**68**] Arslan, M. (2015) Laboratuvar Ölçekli Biyodizel Üretim Tesisinin Projelendirilerek İmal Edilmesi Ve Yabani Zeytinden (Oleaoleaster) Üretilecek Biyodizelin Yakit Özelliklerinin Belirlenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa, Türkiye, 1-88.

[**69**] Sanchez, F., Vasudevan, P.T. (2006) Enzyme catalyzed production of biodiesel from olive oil. Applied Biochemistry and Biotechnology, 135, (1), 1-14.

[**70**] Rajaeifar, M.A., Akram, A., Ghobadian, B., Rafiee, S., Heijungs, R., Tabatabaei, M. (2016) Environmental impact assessment of olive pomace oil biodiesel production and consumption A comparative lifecycle assessment. Energy, 106, 87–102.

[**71**] Gumus, M., Sayin, C., Canakci, 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.

[**72**] Jayabal, R., Thangavelu, L., Subramani, S. (2020) Combined effect of oxygenated additives, injection timing and EGR on combustion, performance and emission characteristics of a CRDi diesel engine powered by sapota biodiesel/diesel blends. Fuel, 276, 118020.

[**73**] Qi, D., Leick, M., Liu, Y., Lee, C.F.F. (2011) Effect of EGR and injection timing on combustion and emission characteristics of split injection strategy DI-diesel engine fueled with biodiesel. Fuel, 90, (5), 1884-1891.

[**74**] Kanth, S., Ananad, T., Debbarma, S., Das, B. (2021) Effect of fuel opening injection pressure and injection timing of hydrogen enriched rice bran biodiesel fuelled in CI engine. International Journal of Hydrogen Energy, 46, (56), 28789–28800.

[**75**] Deokar, A.J., Harari, P.A. (2021) Effect of injection pressure, injection timing and nozzle geometry on performance and emission characteristics of diesel engine operated with thevetia peruviana biodiesel. Materials Today Proceedings, 47 2622-2626.

[**76**] Elumalai, P. V., Parthasarathy, M., Lalvani, J.S.C.I., Das, S.., Iqbal, M. (2021) Effect of Injection Timing in Reducing the Harmful Pollutants Emitted from Ci Engine Using N-Butanol Antioxidant Blended Eco-Friendly Mahua Biodiesel. SSRN Electronic Journal, 7, 6205-6221.

[**77**] Channappagoudra, M., Ramesh, K., Manavendra, G. (2020) Effect of injection timing on modified direct injection diesel engine performance operated with dairy scum biodiesel and Bio-CNG. Renewable Energy, 147, 1019–1032.

[**78**] Gaddigoudar, P.S., Banapurmath, N.R., Basavarajappa, Y.H., Yaliwal, V.S., Harari, P.A., Nataraja, K.M. (2022) Effect of injection timing on the performance of Ceiba Pentandra biodiesel powered dual fuel engine. Materials Today Proceedings, 49, 1756–1761.

[**79**] Kumar, S., Dinesha, P., Rosen, M.A. (2019) Effect of injection pressure on the combustion, performance and emission characteristics of a biodiesel engine with cerium oxide nanoparticle additive. Energy, 185, 1163-1173.

[**80**] Karthic, S. V., Senthil Kumar, M., Nataraj, G., Pradeep, P. (2020) An assessment on injection pressure and timing to reduce emissions on diesel engine powered by renewable fuel. Journal of Cleaner Production, 255, 120186.

[**81**] Liu, K.S. (1994) Preparation of fatty acid methyl esters for gas-chromatographic analysis of lipids in biological materials.

[**82**] Freedman, B., Pryde, E.H., Mounts, T.L. (1984) Variables affecting the yields of fatty esters from transesterified vegetable oils. Journal of the American Oil Chemists Society, 61, (10), 1638–1643.

[83] Çağatay, M.T. (2020) Atık Yemeklik Yağ İle Biyodizel Üretiminde Bir Tepkimeli Damıtma Kolonunun Genelleştirilmiş Öngörmeli Denetimi. Doktora Tezi, Ankara Üniveristesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, Türkiye, 53-58.

[**84**] Borat, O., Sürmen, A., Balcı, M. (1992) Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi vakfı yayınları. Ankara.

[**85**] Ferguson, C.R., Kirkpatric, A.T. (2001) Internal Combustion Engines Applied Thermosciences, Second Edition, John Wiley&Sons, New York, United States, 480.

[**86**] Atkins, R.D. (2009) An Introduction to Engine Testing and Devolopment, SAE International R-344, United States, 1-48.

[**87**] Merker, G.P., Schwarz, C., Teichmann, R. (2012) Combustion Engines Development. Springer-Verlad Berlin Heidelberg, Berlin, Germany.

[**88**] Öz, İ.H., Borat, O., Sürmen, A. (2003) Internal Combustion Engines, Alfa basım yayım dağıtım Ltd, İstanbul, Türkiye.

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

[**90**] Checkel, M.D., Dale, J.D. (1986) Computerized knock detection from engine pressure records. SAE Technical Paper 860028.

[**91**] Çanakcı, M. (2001) Production of biodiesel from feedstocks with high free fatty acids and its effect on diesel engine performance and emissions. Doctor of Philosophy, Mechanical Engineering, Iowa State University, United States.

[**92**] Balki, M.K. (2013) Metanol ve Etanolün Buji Ateşlemeli Bir Motora Uygulanmasında Performans ve Emisyon Parametrelerinin İncelenmesi. Doktora Tezi, Marmara Üniveristesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye, 48.

[**93**] Enweremadu, C.C., Rutto, H.L., Peleowo, N. (2011) Performance evaluation of a diesel engine fueled with methyl ester of shea butter. World Academy of Science, Engineering and Technology, 79 142-146.

[94] Vargün, M.(2021) Etanol-Motorin Karışımları Kullanılan Bir Dizel Motorda Farklı Enjeksijon Stratejilerinin Yanma Karakteristikleri Üzerine Etkisinin İncelenmesi. Yüksek lisain tezi, Kocaeli Üniveristesi Fen Bilimbleri Enstitüsü, Kocaeli, Türkiye, 34.

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

[96] Enweremadu, C.C., Rutto, H.L., Peleowo, N. (2011) Performance evaluation of a diesel engine fueled with methyl ester of shea butter. World Academy of Science, Engineering and Technology, 79 142-146.

[**97**] Zhang, Z.H., Balasubramanian, R. (2016) Investigation of particulate emission characteristics of a diesel engine fueled with higher alcohols/biodiesel blends. Applied Energy, 163, 71-80.

[**98**] Ösezen, A.N., Çanakcı, M. (2009) Biyodizel ve Karışımlarının Kullanıldığı bir Dizel Motorda Performans ve Emisyon Analizi. Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 15, (2), 173–180.

[**99**] Sayin, C., Gumus, M., Canakci, 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.

[**100**] Kegl, B. (2006) Numerical analysis of injection characteristics using biodiesel fuel. Fuel, 85, (17-18), 2377-2387.

[**101**] Doğan, O. (2012) Atık Taşıt Lastiğinden Üretilen Pirolitik Yakıtın Bir Dizel Motorda Kullanımının Deneysel Olarak Araştırılması. Karabük Üniveristesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük , Türkiye, 108.

[**102**] Shareef, S.M., Mohanty, D.K. (2020) Experimental investigations of dairy scum biodiesel in a diesel engine with variable injection timing for performance, emission and combustion. Fuel, 280, 118647.

[**103**] Xue, J. (2013) Combustion characteristics, engine performances and emissions of waste edible oil biodiesel in diesel engine. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 23, 350-365.

[**104**] Teoh, Y.H., Yaqoob, H., How, H.G., Le, T.D., Nguyen, H.T. (2022) Comparative assessment of performance, emissions and combustion characteristics of tire pyrolysis oil-diesel and biodiesel-diesel blends in a common-rail direct injection engine. Fuel, 313, 123058.

[**105**] Karthik, T., Banapurmath, N.R., Basavarajappa, D.N., Ganachari, S. V., Kulkarni, P.S., Harari, P.A. (2021) Effect of injection timing on the performance of dual fuel engine fueled with algae nano-biodiesel blends and biogas. Materials Today Proceedings, 59, 289-296.

[**106**] Öztürk, E., Can, Ö. (2022) Effects of EGR, injection retardation and ethanol addition on combustion, performance and emissions of a DI diesel engine fueled with canola biodiesel/diesel fuel blend. Energy, 244, 123129.

[**107**] Yogesh, P., Murali, B., Muniamuthu, S. (2022) Experimental analysis of CI engine running with mango seed biodiesel at optimum fuel injection pressure. Materials Today Proceedings, 62, 1889-1893.

[**108**] Asokan, M.A., Prabu, S.S., Akhil, V.S., Bhuvan, P.S., Reddy, Y.B. (2021) Performance and emission behaviour of diesel and blends of watermelon seed oil biodiesel in direct injection diesel engine. Materials Today Proceedings, 45, 3274–3278.

[**109**] Xue, J., Grift, T.E., Hansen, A.C. (2011) Effect of biodiesel on engine performances and emissions. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 15, 1098-1116.

[**110**] Varatharajan, K., Cheralathan, M., Velraj, R. (2011) Mitigation of NOx emissions from a jatropha biodiesel fuelled di diesel engine using antioxidant additives. Fuel, 90, (8), 2721-2725.

[**111**] Çelik, M. (2015) Biyodizel Yakıt Özelliklerinin Motor Performansı Ve Emisyon Karakteristiklerine Etkilerinin İncelenmesi. Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, Türkiye, 85-167.

[**112**] Wang, Y.P., Tang, J.S., Chu, C.Q., Tian, J. (2000) A preliminary study on the introduction and cultivation of Crambe abyssinica in China, an oil plant for industrial uses. Industrial Crops and Products, 12, (1), 47-52.

[**113**] Uyaroğlu, A. (2015) Crambe Tohumlarından Biyodizel Üretimi Ve Dizel Motorlarında Alternatif Yakıt Olarak Kullanımı, Doktora Tezi. Gazi Üniveristesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, Türkiye, 89.

[**114**] Peterson, C.L., Hustrulid, T. (1998) Carbon cycle for rapeseed oil biodiesel fuels. Biomass and Bioenergy, 14, (2), 91-101.

[115] Erdogan, S., Balki, M,K., Aydın, S., Sayin, C,. (2020) Performance , emission and combustion characteristic assessment of biodiesels derived from beef bone marrow in a diesel generator. Energy, 207, 118300.

[**116**] Giakoumis, E.G., Rakopoulos, C.D., Dimaratos, A.M., Rakopoulos, D.C. (2012) Exhaust emissions of diesel engines operating under transient conditions with biodiesel fuel blends. Progress in Energy and Combustion Science, 38, 691-715.

[**117**] Özener, O., Yüksek, L., Ergenç, A.T., Özkan, M. (2014) Effects of soybean biodiesel on a DI diesel engine performance, emission and combustion characteristics. Fuel, 115, 875-883.

[**118**] Şanlı, H. (2013) Atık Kızartma Yağlarının Karakterizasyonu ve Biyodizel Üretiminde Değerlendirilmesi. Kocaeli Üniversitesi,Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, Türkiye, 54-63.

[**119**] Soruşbay, C., Soyhan, S. (1995) Doğalgaz Motorlarında Egzoz Emisyonu. Doğal Gaz Dergisi, 37, 156–163.

[**120**] Kaya, M. (2010) Biyodizel-Dizel Karışımı Kullanılan Bir Dizel Motorda Püskürtme Basıncının Performans Ve Emisyonlara Etkisi. Marmara Üniversitesi, Fen bilimleri Enstitüsü, Kocaeli,Türkiye, 49-53.

[**121**] Hariram, V., Ravikumar Solomon, G., Raj, D.S., Jithendra Dev, M., Naveen Kumar, U., Gokulakesavan, M., Micha Premkumar, T., Seralathan, S. (2020) Impact of compression ratio in the emission and performance phenomenon of a CI engine fuelled with jojoba biodiesel blends. Materials Today Proceedings, 33, 3510–3519.

[**122**] Pavan, P., Bhaskar, K., Sekar, S. (2021) Effect of split injection and injection pressure on CRDI engine fuelled with POME-diesel blend. Fuel, 292, 120242.

[**123**] Suresh, K. V., Fernandes, P., Raju, K. (2021) Effect of injection pressure on performance and emission of diesel engine with blends of Honge-Rice bran bio diesel. Materials Today Proceedings, 35, 489–493.

[**124**] Jaliliantabar, F., Ghobadian, B., Carlucci, A.P., Najafi, G., Mamat, R., Ficarella, A., Strafella, L., Santino, A., De Domenico, S. (2020) A comprehensive study on the effect of pilot injection, EGR rate, IMEP and biodiesel characteristics on a CRDI diesel engine. Energy, 194, 116860.

[**125**] Kumar, S., Dinesha, P., Rosen, M.A. (2019) Effect of injection pressure on the combustion, performance and emission characteristics of a biodiesel engine with cerium oxide nanoparticle additive. Energy, 185, 1163-1173..

[**126**] Suhel, A., Norwazan, A.R., Rahman, M.R.A., Ahmad, K.A. Bin (2021) Dataset for influence of CNG and HCNG on engine performance and emission parameters at diverse injection pressure. Data in Brief, 35, 106838.

EKLER

Ek 1- Tablo 1. Dizel yakıtı ile yapılan deneylerin standart sapma sonuçları

Deney No:	Dizel ile yapılan deneyler	Motor Gücü	ÖYT	EGS	$P_{mak.}$
1	%25 Yük, Standart püskürtme avansı	0,132	0,063	2,210	0,891
2	%50 Yük, Standart püskürtme avansı	0,153	0,071	0,972	0,997
3	%75 Yük, Standart püskürtme avansı	0,211	0,060	0,867	0,806
4	%100 Yük, Standart püskürtme avansı	0,340	0,056	1,984	1,783
5	%25 Yük, -2 ^{o}KA püskürtme avansı	0,123	0,056	2,245	1,004
6	%50 Yük, -2 ^{o}KA püskürtme avansı	0,130	0,066	1,271	1,203
7	%75 Yük, -2 ^{o}KA püskürtme avansı	0,150	0,059	1,410	0,880
8	%100 Yük, -2 ^{o}KA püskürtme avansı	0,204	0,090	2,534	0,842
9	%25 Yük, +2 ^{o}KA püskürtme avansı	0,116	0,057	0,212	0,942
10	%50 Yük, +2 ^{o}KA püskürtme avansı	0,127	0,055	1,250	1,129
11	%75 Yük, +2 ^{o}KA püskürtme avansı	0,150	0,073	1,621	0,874
12	%100 Yük, +2 ^{o}KA püskürtme avansı	0,207	0,057	2,071	1,594
13	%25 Yük, +4 ^{o}KA püskürtme avansı	0,121	0,074	0,634	0,858
14	%50 Yük, +4 ^{o}KA püskürtme avansı	0,132	0,065	0,966	0,989
15	%75 Yük, +4 ^{o}KA püskürtme avansı	0,155	0,057	2,094	0,847
16	%100 Yük, +4 ^{o}KA püskürtme avansı	0,202	0,070	0,447	1,089
17	%25 Yük, +100 bar püskürtme basıncı	0,116	0,058	0,244	1,044
18	%50 Yük, +100 bar püskürtme basıncı	0,136	0,049	1,424	1,196
19	%75 Yük, +100 bar püskürtme basıncı	0,162	0,062	0,751	1,100
20	%100 Yük, +100 bar püskürtme basıncı	0,340	0,056	1,984	1,783
21	%25 Yük, +200 bar püskürtme basıncı	0,127	0,062	3,880	1,156
22	%50 Yük, +200 bar püskürtme basıncı	0,138	0,082	2,114	1,285
23	%75 Yük, +200 bar püskürtme basıncı	0,196	0,061	0,720	1,225
24	%100 Yük, +200 bar püskürtme basıncı	0,340	0,056	1,984	1,783
25	%25 Yük, -100 bar püskürtme basıncı	0,116	0,058	0,333	0,986
26	%50 Yük, -100 bar püskürtme basıncı	0,138	0,079	1,583	1,240
27	%75 Yük, -100 bar püskürtme basıncı	0,185	0,082	0,352	1,112
28	%100 Yük, -100 bar püskürtme basıncı	0,240	0,072	0,428	0,970

Ek 1- Tablo 2. B20 yakıtı ile yapılan deneylerin standart sapma sonuçları

Deney No:	B20 ile yapılan deneyler	Motor Gücü	ÖYT	EGS	$P_{mak.}$
29	%25 Yük, Standart püskürtme avansı	0,125	0,031	0,197	0,618
30	%50 Yük, Standart püskürtme avansı	0,155	0,019	1,831	0,727
31	%75 Yük, Standart püskürtme avansı	0,263	0,020	2,990	1,520
32	%100 Yük, Standart püskürtme avansı	0,244	0,540	1,138	0,455
33	%25 Yük, -2 ºKA püskürtme avansı	0,126	0,021	2,137	0,677
34	%50 Yük, -2 ºKA püskürtme avansı	0,143	0,061	0,932	0,691
35	%75 Yük, -2 ºKA püskürtme avansı	0,200	0,105	3,679	1,573
36	%100 Yük, -2 ºKA püskürtme avansı	0,238	0,016	0,423	0,677
37	%25 Yük, +2 ºKA püskürtme avansı	0,123	0,026	1,267	0,679
38	%50 Yük, +2 ºKA püskürtme avansı	0,150	0,022	1,592	0,839
39	%75 Yük, +2 ºKA püskürtme avansı	0,220	0,029	2,642	1,080
40	%100 Yük, +2 ºKA püskürtme avansı	0,244	0,044	0,560	0,479
41	%25 Yük, +4 ºKA püskürtme avansı	0,124	0,021	3,421	0,721
42	%50 Yük, +4 ºKA püskürtme avansı	0,160	0,051	0,391	0,818
43	%75 Yük, +4 ºKA püskürtme avansı	0,196	0,033	3,257	1,017
44	%100 Yük, +4 ºKA püskürtme avansı	0,235	0,030	1,438	0,512
45	%25 Yük, +100 bar püskürtme basıncı	0,119	0,061	2,937	0,727
46	%50 Yük, +100 bar püskürtme basıncı	0,140	0,032	0,884	0,897
47	%75 Yük, +100 bar püskürtme basıncı	0,198	0,023	2,156	0,615
48	%100 Yük, +100 bar püskürtme basıncı	0,244	0,540	1,138	0,455
49	%25 Yük, +200 bar püskürtme basıncı	0,131	0,028	2,345	0,771
50	%50 Yük, +200 bar püskürtme basıncı	0,159	0,024	1,445	0,950
51	%75 Yük, +200 bar püskürtme basıncı	0,199	0,041	2,340	0,675
52	%100 Yük, +200 bar püskürtme basıncı	0,244	0,540	1,138	0,455
53	%25 Yük, -100 bar püskürtme basıncı	0,110	0,048	1,283	0,766
54	%50 Yük, -100 bar püskürtme basıncı	0,139	0,031	1,088	0,901
55	%75 Yük, -100 bar püskürtme basıncı	0,184	0,025	2,324	1,967
56	%100 Yük, -100 bar püskürtme basıncı	0,232	0,115	0,647	0,508

Ek 1- Tablo 3. B40 yakıtı ile yapılan deneylerin standart sapma sonuçları

Deney No:	B40 ile yapılan deneyler	Motor Gücü	ÖYT	EGS	$P_{mak.}$
57	%25 Yük, Standart püskürtme avansı	0,130	0,168	0,328	0,991
58	%50 Yük, Standart püskürtme avansı	0,161	0,050	1,288	1,226
59	%75 Yük, Standart püskürtme avansı	0,197	0,096	1,474	1,134
60	%100 Yük, Standart püskürtme avansı	0,247	0,140	0,285	0,960
61	%25 Yük, -2 ºKA püskürtme avansı	0,133	0,069	0,304	0,909
62	%50 Yük, -2 ºKA püskürtme avansı	0,155	0,055	1,239	1,073
63	%75 Yük, -2 ºKA püskürtme avansı	0,190	0,087	0,496	1,125
64	%100 Yük, -2 ºKA püskürtme avansı	0,244	0,344	0,358	1,426
65	%25 Yük, +2 ºKA püskürtme avansı	0,127	0,071	0,383	0,919
66	%50 Yük, +2 ºKA püskürtme avansı	0,162	0,069	1,275	1,156
67	%75 Yük, +2 ºKA püskürtme avansı	0,234	0,111	1,140	1,148
68	%100 Yük, +2 ºKA püskürtme avansı	0,361	0,132	3,986	5,667
69	%25 Yük, +4 ºKA püskürtme avansı	0,129	0,045	0,952	0,819
70	%50 Yük, +4 ºKA püskürtme avansı	0,174	0,056	2,545	1,090
71	%75 Yük, +4 ºKA püskürtme avansı	0,266	0,035	1,435	1,146
72	%100 Yük, +4 ºKA püskürtme avansı	0,252	0,063	0,796	1,594
73	%25 Yük, +100 bar püskürtme basıncı	0,146	0,055	0,262	0,928
74	%50 Yük, +100 bar püskürtme basıncı	0,163	0,071	1,575	1,159
75	%75 Yük, +100 bar püskürtme basıncı	0,210	0,071	2,196	2,702
76	%100 Yük, +100 bar püskürtme basıncı	0,247	0,140	0,285	0,960
77	%25 Yük, +200 bar püskürtme basıncı	0,125	0,055	1,196	0,930
78	%50 Yük, +200 bar püskürtme basıncı	0,160	0,069	1,467	1,169
79	%75 Yük, +200 bar püskürtme basıncı	0,203	0,064	1,938	1,223
80	%100 Yük, +200 bar püskürtme basıncı	0,247	0,140	0,285	0,960
81	%25 Yük, -100 bar püskürtme basıncı	0,137	0,062	0,566	0,916
82	%50 Yük, -100 bar püskürtme basıncı	0,153	0,084	0,763	1,207
83	%75 Yük, -100 bar püskürtme basıncı	0,204	0,062	2,273	2,182
84	%100 Yük, -100 bar püskürtme basıncı	0,247	0,054	0,600	1,446

Ek 1- Tablo 4. B60 yakıtı ile yapılan deneylerin standart sapma sonuçları

Deney No:	B60 ile yapılan deneyler	Motor Gücü	ÖYT	EGS	$P_{mak.}$
85	%25 Yük, Standart püskürtme avansı	0,133	0,043	2,774	0,786
86	%50 Yük, Standart püskürtme avansı	0,138	0,114	2,302	0,835
87	%75 Yük, Standart püskürtme avansı	0,166	0,085	1,174	1,054
88	%100 Yük, Standart püskürtme avansı	0,194	0,049	1,868	1,572
89	%25 Yük, -2 ºKA püskürtme avansı	0,141	0,033	2,039	0,768
90	%50 Yük, -2 ºKA püskürtme avansı	0,153	0,032	1,367	0,921
91	%75 Yük, -2 ºKA püskürtme avansı	0,182	0,165	2,770	2,290
92	%100 Yük, -2 ºKA püskürtme avansı	0,224	0,093	0,938	1,600
93	%25 Yük, +2 ºKA püskürtme avansı	0,126	0,048	2,091	1,004
94	%50 Yük, +2 ºKA püskürtme avansı	0,159	0,043	0,446	1,214
95	%75 Yük, +2 ºKA püskürtme avansı	0,191	0,052	0,709	0,954
96	%100 Yük, +2 ºKA püskürtme avansı	0,256	0,040	1,448	2,380
97	%25 Yük, +4 ºKA püskürtme avansı	0,125	0,051	1,526	0,889
98	%50 Yük, +4 ºKA püskürtme avansı	0,155	0,067	1,081	1,089
99	%75 Yük, +4 ºKA püskürtme avansı	0,202	0,049	0,800	1,098
100	%100 Yük, +4 ºKA püskürtme avansı	0,232	0,033	0,644	1,363
101	%25 Yük, +100 bar püskürtme basıncı	0,099	0,045	0,919	0,878
102	%50 Yük, +100 bar püskürtme basıncı	0,115	0,051	2,204	1,008
103	%75 Yük, +100 bar püskürtme basıncı	0,161	0,056	1,854	1,204
104	%100 Yük, +100 bar püskürtme basıncı	0,194	0,049	1,868	1,572
105	%25 Yük, +200 bar püskürtme basıncı	0,110	0,052	1,223	0,866
106	%50 Yük, +200 bar püskürtme basıncı	0,136	0,046	1,604	1,112
107	%75 Yük, +200 bar püskürtme basıncı	0,194	0,042	1,810	2,463
108	%100 Yük, +200 bar püskürtme basıncı	0,194	0,049	1,868	1,572
109	%25 Yük, -100 bar püskürtme basıncı	0,139	0,044	1,146	0,835
110	%50 Yük, -100 bar püskürtme basıncı	0,140	0,458	0,853	0,781
111	%75 Yük, -100 bar püskürtme basıncı	0,192	0,415	1,853	0,858
112	%100 Yük, -100 bar püskürtme basıncı	0,269	0,395	1,588	1,255

Ek 1- Tablo 5. B80 yakıtı ile yapılan deneylerin standart sapma sonuçları

Deney No:	B80 ile yapılan deneyler	Motor Gücü	ÖYT	EGS	$P_{mak.}$
113	%25 Yük, Standart püskürtme avansı	0,112	2,099	0,958	0,807
114	%50 Yük, Standart püskürtme avansı	0,120	1,256	1,467	1,019
115	%75 Yük, Standart püskürtme avansı	0,169	1,306	2,343	1,095
116	%100 Yük, Standart püskürtme avansı	0,234	1,922	0,345	0,549
117	%25 Yük, -2 ºKA püskürtme avansı	0,130	0,437	0,875	1,093
118	%50 Yük, -2 ºKA püskürtme avansı	0,165	0,962	1,097	1,390
119	%75 Yük, -2 ºKA püskürtme avansı	0,182	2,240	3,112	3,108
120	%100 Yük, -2 ºKA püskürtme avansı	0,216	1,520	1,007	0,471
121	%25 Yük, +2 ºKA püskürtme avansı	0,086	1,110	3,190	0,600
122	%50 Yük, +2 ºKA püskürtme avansı	0,110	0,749	2,469	0,761
123	%75 Yük, +2 ºKA püskürtme avansı	0,161	1,247	2,053	0,908
124	%100 Yük, +2 ºKA püskürtme avansı	0,209	1,791	0,232	0,408
125	%25 Yük, +4 ºKA püskürtme avansı	0,099	0,669	1,459	0,579
126	%50 Yük, +4 ºKA püskürtme avansı	0,115	0,984	1,197	0,791
127	%75 Yük, +4 ºKA püskürtme avansı	0,162	0,972	3,580	1,555
128	%100 Yük, +4 ºKA püskürtme avansı	0,229	1,718	0,735	0,439
129	%25 Yük, +100 bar püskürtme basıncı	0,105	0,882	0,531	0,865
130	%50 Yük, +100 bar püskürtme basıncı	0,133	0,706	1,026	1,065
131	%75 Yük, +100 bar püskürtme basıncı	0,219	1,695	1,987	2,519
132	%100 Yük, +100 bar püskürtme basıncı	0,234	1,922	0,345	0,549
133	%25 Yük, +200 bar püskürtme basıncı	0,114	1,245	1,104	0,901
134	%50 Yük, +200 bar püskürtme basıncı	0,132	1,293	0,612	1,141
135	%75 Yük, +200 bar püskürtme basıncı	0,186	0,735	1,851	1,311
136	%100 Yük, +200 bar püskürtme basıncı	0,234	1,922	0,345	0,549
137	%25 Yük, -100 bar püskürtme basıncı	0,119	0,960	1,500	0,707
138	%50 Yük, -100 bar püskürtme basıncı	0,109	1,394	1,195	0,825
139	%75 Yük, -100 bar püskürtme basıncı	0,171	0,672	2,976	1,375
140	%100 Yük, -100 bar püskürtme basıncı	0,236	1,195	0,333	0,469

Ek 1- Tablo 6. B100 yakıtı ile yapılan deneylerin standart sapma sonuçları

Deney No:	B100 ile yapılan deneyler	Motor Gücü	ÖYT	EGS	$P_{mak.}$
142	%25 Yük, Standart püskürtme avansı	0,162	0,291	1,800	0,831
143	%50 Yük, Standart püskürtme avansı	0,213	0,532	1,052	0,913
144	%75 Yük, Standart püskürtme avansı	0,262	0,647	0,392	0,416
145	%100 Yük, Standart püskürtme avansı	0,128	0,126	0,127	0,563
146	%25 Yük, -2 ºKA püskürtme avansı	0,148	0,178	2,266	0,682
147	%50 Yük, -2 ºKA püskürtme avansı	0,307	0,260	2,225	2,463
148	%75 Yük, -2 ºKA püskürtme avansı	0,255	0,089	0,674	0,349
149	%100 Yük, -2 ºKA püskürtme avansı	0,116	0,135	2,661	0,546
150	%25 Yük, +2 ºKA püskürtme avansı	0,136	0,692	1,694	0,689
151	%50 Yük, +2 ºKA püskürtme avansı	0,180	0,130	2,650	1,270
152	%75 Yük, +2 ºKA püskürtme avansı	0,252	0,189	0,874	0,478
153	%100 Yük, +2 ºKA püskürtme avansı	0,130	0,068	2,263	0,642
154	%25 Yük, +4 ºKA püskürtme avansı	0,146	0,094	0,455	0,714
155	%50 Yük, +4 ºKA püskürtme avansı	0,256	0,040	1,108	1,862
156	%75 Yük, +4 ºKA püskürtme avansı	0,259	0,362	0,295	0,396
157	%100 Yük, +4 ºKA püskürtme avansı	0,119	0,061	2,937	0,727
158	%25 Yük, +100 bar püskürtme basıncı	0,140	0,032	0,884	0,897
159	%50 Yük, +100 bar püskürtme basıncı	0,198	0,023	2,156	0,615
160	%75 Yük, +100 bar püskürtme basıncı	0,244	0,540	1,138	0,455
161	%100 Yük, +100 bar püskürtme basıncı	0,131	0,028	2,345	0,771
162	%25 Yük, +200 bar püskürtme basıncı	0,159	0,024	1,445	0,950
163	%50 Yük, +200 bar püskürtme basıncı	0,199	0,041	2,340	0,675
164	%75 Yük, +200 bar püskürtme basıncı	0,244	0,540	1,138	0,455
165	%100 Yük, +200 bar püskürtme basıncı	0,110	0,048	1,283	0,766
166	%25 Yük, -100 bar püskürtme basıncı	0,139	0,031	1,088	0,901
167	%50 Yük, -100 bar püskürtme basıncı	0,184	0,025	2,324	1,967
168	%75 Yük, -100 bar püskürtme basıncı	0,232	0,115	0,647	0,508