



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

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**DİZEL MOTORLARINDA YAKIT OLARAK FARKLI
ORANLARDA METANOL KULLANIMININ SAYISAL
İNCELENMESİ**

Esra ÇİÇEKLİYÜZ

**Nisan-2024
BATMAN**

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

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**DİZEL MOTORLARINDA YAKIT OLARAK FARKLI
ORANLARDA METANOL KULLANIMININ SAYISAL
İNCELENMESİ**

Esra ÇİÇEKLİYÜZ

**Danışman
Prof. Dr. Şehmus ALTUN**

**Nisan-2024
BATMAN**

TEZ KABUL VE ONAYI

Esra ÇİÇEKLİYÜZ tarafından hazırlanan “DİZEL MOTORLARINDA YAKIT OLARAK FARKLI ORANLARDA METANOL KULLANIMININ SAYISAL İNCELENMESİ” adlı tez çalışması 23/04/2024 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Batman Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Başkan

Prof. Dr. Yasin VAROL

.....

Danışman

Prof. Dr. Şehmus ALTUN

.....

Üye

Doç. Dr. Tolga TOPKAYA

.....

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

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

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

Esra ÇİÇEKLİYÜZ

Tarih: 15.05.2024

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

DİZEL MOTORLARINDA YAKIT OLARAK FARKLI ORANLARDA METANOL KULLANIMININ SAYISAL İNCELENMESİ

Esra ÇİÇEKLİYÜZ

Batman Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Şehmus ALTUN

2024, 73 Sayfa

Jüri

Prof. Dr. Şehmus ALTUN

Prof. Dr. Yasin VAROL

Doç. Dr. Tolga TOPKAYA

İçten yanmalı dizel motorlarında petrol kökenli yakıt tüketiminin ve zararlı egzoz emisyonlarının azaltılması çalışmaları kapsamında alkol yakıtları yoğun bir şekilde araştırılmaktadır. Alkol yakıtları arasında özellikle taşımacılık sektörünün karbonsuzlaştırılması kapsamında metil alkole (metanol) olan ilgi giderek artmaktadır. Bu çalışmada bir dizel motorunda alternatif yakıt olarak farklı oranlarda metanol kullanılmasının sayısal olarak araştırılması amaçlanmıştır. Bu amaç ile dizel yakıtına kademeli oranlarda eklenen metanolün ANSYS-Forte ortamında oluşturulan tek silindirli ve direkt püskürtmeli bir dizel motor modelinde yakıt olarak kullanılması sonucu yanma ve egzoz emisyon karakteristiklerindeki değişimler incelenmiş ve ayrıca en fazla metanol oranının tespit edilmesi amaçlanmıştır. Çalışma iki aşamada gerçekleştirilmiştir. Öncelikle dizel yakıtına hacimsel olarak metanol eklenmesinin etkisi araştırılmıştır. Bu şekilde hacimsel olarak %40 oranına kadar eklenmiş ancak bu oranda yanma yeterli bir düzeyde gerçekleşmemiştir. Dolayısıyla hacimsel olarak %10, %20 ve %30 oranlarında metanol ve dizel yakıtından oluşan (M10, M20 ve M30) karışım yakıtları kullanılarak motor performansı, egzoz emisyonları ve yanma karakteristikleri sayısal olarak incelenmiştir. Daha sonra %10 metanol içeren (M10) yakıt karışımı ile farklı püskürtme avansları çalışılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, yakıttaki metanol oranının artmasıyla indike basınç, maksimum basınç, yanma verimliliği, ısı salınımı, maksimum sıcaklık, silindir içi basınç, HC, NO_x ve CO emisyonu değerlerinde düşüş izlenirken, ısı veriminde ise başta bir miktar artış izlenirken daha sonra yakıt karışımındaki metanol oranının artışına bağlı olarak ısı veriminde düşüş olduğu görülmüştür. Çalışmanın ikinci aşaması olan M10 yakıtında püskürtme avansının arttırılmasıyla, maksimum basınç, yanma verimliliği, yanmamış HC emisyonu, NO_x, ısı salınım oranı, maksimum sıcaklık ve silindir içi basınç değerlerinde artış; indike basınç, ısı verim ve CO emisyonunda ise avansın arttırılmasıyla birlikte düşüş olduğu tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Ansys, Dizel, Emisyon, Metanol, Performans, Yanma

ABSTRACT

MS THESIS

NUMERICAL INVESTIGATION OF THE USE OF DIFFERENT RATIOS OF METHANOL AS FUEL IN DIESEL ENGINES

Esra ÇİÇEKLİYÜZ

Batman University Graduate Education Institute

Mechanical Engineering Department of Science

Advisor: Prof. Dr. Şehmus ALTUN

2024, 73 Pages

Jury

Prof. Dr. Şehmus ALTUN

Prof. Dr. Yasin VAROL

Assoc. Prof. Dr. Tolga TOPKAYA

Alcohol fuels are being intensively researched within the scope of efforts to reduce petroleum-based fuel consumption and harmful exhaust emissions in internal combustion diesel engines. Among alcohol fuels, interest in methyl alcohol (methanol) is increasing, especially within the scope of decarbonization of the transportation sector. In this study, it is aimed to numerically investigate the use of different amounts of methanol as an alternative fuel in a diesel engine. For this purpose, the changes in combustion and exhaust emission characteristics as a result of using methanol added to diesel fuel in gradual proportions as fuel in a single-cylinder and direct injection diesel engine model created in the ANSYS-Forte environment were examined and it was also aimed to determine the maximum methanol ratio. The study was carried out in two stages. First of all, the effect of adding volumetric methanol to diesel fuel was investigated. In this way, up to 40% by volume was added, but combustion did not occur at a sufficient level at this rate. Therefore, engine performance, exhaust emissions and combustion characteristics were numerically examined by using mixture fuels consisting of methanol and diesel fuel (M10, M20 and M30) in the ratios of 10%, 20% and 30% by volume. Then, different injection advances were studied with a fuel mixture containing 10% methanol (M10). According to the results obtained, as the methanol ratio in the fuel increases, a decrease is observed in the indicated pressure, maximum pressure, combustion efficiency, heat release, maximum temperature, in-cylinder pressure, HC, NO_x and CO emission values, while a slight increase in thermal efficiency is observed at first, but then the increase in the fuel mixture decreases. It was observed that there was a decrease in thermal efficiency due to the increase in methanol ratio. By increasing the injection advance in M10 fuel, which is the second stage of the study, an increase in maximum pressure, combustion efficiency, unburned HC emission, NO_x, heat release rate, maximum temperature and in-cylinder pressure values; It was determined that there was a decrease in indicated pressure, thermal efficiency and CO emission as the advance was increased.

Keywords: Ansys, Combustion, Diesel, Emission, Methanol, Performance

ÖNSÖZ

Günümüzde içten yanmalı motorlarda petrol kökenli yakıtlardan kaynaklanan emisyonların azaltılması ve çevre kirliliğinin önlenmesi amacıyla araştırmacıları petrol kökenli yakıtlara yakıt katkısı olarak kullanılabilecek yeni alternatif yakıtların araştırılmasına sevk etmiştir. Bu çalışmada emisyonların azaltılmasında olumlu etkisi olduğu bilinen metanol yakıtının ilk aşamada dizel yakıtı yakıt katkısı olarak farklı oranlarda metanol kullanılmasının motor performans, egzoz emisyonları ve yanma karakteristiklerine etkisi incelenmiştir. Daha sonra farklı püskürtme avans değerlerindeki motor performans, egzoz emisyonlarında ve yanma karakteristikleri üzerindeki etkileri sayısal olarak incelenmiştir.

Tez çalışmamın her aşamasında desteklerini esirgemeyip, bilgi ve tecrübeleriyle çalışmalarına yön veren danışmanım Prof. Dr. Şehmus ALTUN hocama teşekkürü bir borç bilirim. Dr. Öğr. Üyesi Mutlu OKÇU ve Dr. Öğr. Üyesi M. Şükrü ADİN'e ayrıca yardım ve katkılarından dolayı teşekkür ederim.

Son olarak eğitim hayatım boyunca maddi ve manevi destekleriyle hep yanımda olduklarını hissettiren canım aileme sonsuz teşekkür ediyorum.

Esra ÇİÇEKLİYÜZ
BATMAN-2024

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
ÖNSÖZ	vi
İÇİNDEKİLER	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR	viii
1. GİRİŞ	1
1.1. Metanol	5
1.1.1. Metanol üretimi.....	6
1.1.2. Metanolün fiziksel ve kimyasal özellikleri	7
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	10
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	21
3.1. Çözücü Ayrıntıları	23
3.2. Çalışma Koşulları	23
3.3. Mesh Bağımsızlığı ve Model Doğrulama	25
4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA.....	27
4.1. Farklı Metanol Oranlarındaki (M10, M20, M30) Motor Performansı	27
4.2. Farklı Metanol Oranlarındaki (M10, M20, M30) Egzoz Emisyonları	31
4.3. Farklı Metanol Oranlarındaki (M10, M20, M30) Yanma Karakteristikleri	35
4.4. M10 Yakıtının Farklı Püskürtme Avanslarındaki Motor Performansı	39
4.5. M10 Yakıtının Farklı Püskürtme Avanslarındaki Egzoz Emisyonları	44
4.6. M10 Yakıtının Farklı Püskürtme Avanslarındaki Yanma Karakteristikleri.....	49
4.7. Dizel Yakıt, M10 ve M20 Yakıtlarının Silindir İçi NO _x ve Sıcaklık Konturları. 52	
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	54
5.1. Sonuçlar	54
5.2. Öneriler	55
KAYNAKLAR	56
ÖZGEÇMİŞ	63

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

%	: Yüzde
°C	: Derece santigrat
°KA	: Derece krank açısı
C	: Karbon
CH ₃ OH	: Metanol
CH ₄	: Metan
CO	: Karbonmonoksit
CO ₂	: Karbondioksit
H	: Hidrojen
HC	: Hidrokarbon
NO ₂	: Nitrojen
NO _x	: Azot Oksit
O	: Oksijen

Kısaltmalar

3D	:Üç Boyutlu
AİY	:Alkol İkame Yüzdesi
BD	:Biyodizel
BG	:Biyogaz
CRDI	:Common Rail Direkt Enjeksiyonlu
DY	:Dizel Yakıt
EGR	:Egzoz Gazı Resirkülasyonu
EVA	:Emme Valfi Açma
EVK	:Egzoz Valfi Kapatma
FÖYT	:Fren Özgöl Yakıt Tüketimi
FTV	:Fren Termal Verimi
GBI	:Gizli Buharlaştırma Isısı
HAD	:Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği
HC	:Hidrokarbon
IMEP	:Ortalama Efektif Basınç
ISH	:Isı Salınım Hızı
KKTS	:Kendi Kendine Tutuşma Sıcaklığı
KMA	:Krank Mili Açısı
LPG	:Sıvılaştırılmış Petrol Gazı
M10	:%10 Metanol + %90 Dizel Yakıt Karışımı
M20	:%20 Metanol + %80 Dizel Yakıt Karışımı
M30	:%30 Metanol + %70 Dizel Yakıt Karışımı
MON	:Motor Oktan Sayısı(Motor Octane Number)
ÖYT	:Özgöl Yakıt Tüketimi
PA	:Püskürtme Avansı
PM	:Partikül Madde
RCCI	:Reaktivite Kontrollü Sıkıştırma ile Ateşlemeli
RON	:Araştırma Oktan Sayısı(Research Octane Number)
TG	:Tutuşma Gecikmesi
ÜÖN	:Üst Ölü Nokta
ÜÖNÖ	:Üst Ölü Noktadan Önce
ÜÖNS	:Üst Ölü Noktadan Sonra

1. GİRİŞ

Sanayinin hızla geliştiği ve nüfusun hızla arttığı çağımızda enerjiye olan ihtiyaç her geçen gün artmaktadır. Uluslararası Enerji Görünümüne göre; 2030 yılında 2005 yılına kıyasla dünyanın enerji ihtiyacının %50 oranında artacağı ve bu enerji ihtiyacının %26-27'sinin fosil kökenli yakıtlardan elde edileceği öngörülmektedir (Çelik ve Özgören, 2017; Yeşilyurt, 2017). Dünyada enerji ihtiyacının karşılanması için birçok kaynaktan faydalanılmaktadır. Genel olarak enerji elde etmede kullanılan kaynaklar “Primer” ve “Sekonder” olmak üzere iki grupta ele alınmaktadır. Birincil enerji kaynakları kömür, doğalgaz ve petrol gibi yenilenemeyen kaynaklardır. Jeotermal enerji santralleri, hidroelektrik santralleri ve biyokütle ise ikincil enerji kaynaklarına yani yenilenebilir enerji kaynaklarına örnek olarak verilebilir. Birincil enerji ihtiyacının %90'ı fosil kökenli yakıtlardan karşılanmaktadır. Bu fosil kökenli yakıtlar içerisinde %45 ile en önemli pay petrole aittir. Doğalgazın payı %16 ve kömürün ise %14 civarındadır (Özer, 2010; Ateş, 2021). Dünyadaki enerji tüketiminde tüm türlerde artış kaydedilirken buna karşın fosil enerji rezervleri hızla azalmaktadır. Örneğin, 2020 yıl sonu itibarıyla dünya petrol tüketimi 88,7 milyon v/g iken, bu tüketim 2021 yılında %9'luk bir artışla 94,1 milyon v/g kadar olmuştur (TPAO Sektör Raporu, 2022).

Son 5 yıllık tüketimlere göre Dünya'nın günlük ortalama petrol talebi 97 milyon varil, yıllık toplam talep ise 35 milyar 405 milyon varildir. Yeni rezerv tespiti olmayacağı ve tüketimin bu hızda süreceği varsayımıyla, mevcut 1 trilyon 780 milyar varil petrol rezervinin 50,2 yıla yeteceği öngörülmektedir (enerjiatlasi.com).

Petrol rezervlerinin azalmasının yanında petrol türevi yakıtların aşırı kullanımı çevre ve hava kirliliğine sebep olmaktadır. Bunlar arasında küresel ısınma en önemli çevre sorunu olmaktadır. Dolayısıyla taşımacılık, inşaat, tarımsal ve endüstriyel uygulamalarda güç kaynağı olarak kullanılan içten yanmalı sıkıştırma ile ateşlemeli motorlarda (dizel motorlar) çoğunlukla petrol kökenli yakıtlar kullanılmaktadır. Günümüzde petrol kaynaklarının sınırlı olması ve bu yakıtların kullanımından kaynaklanan zararlı egzoz emisyonlarının sebep olduğu problemler nedeni ile alternatif yakıtların kullanımı teşvik edilmektedir (Altun, 2009). İçten yanmalı motorlarda alternatif yakıt olarak kullanılacak olan yakıtın bir takım özelliklere sahip olması gereklidir. Bunlar arasında kullanılacak yakıtın maliyetinin az olması, bol miktarda üretilmesi, ısı değeri yüksek olması, taşınabilir ve kolayca depo edilebilmesi, düşük düzeyde egzoz emisyonları oluşturması ya da eğer petrol kökenli

yakıtlarla karıştırılarak kullanılacaksa faz ayrışması olmadan petrol kökenli yakıtların içinde iyi çözünerek kararlı bir karışım oluşturmaları gibi özellikleri sağlaması istenilmektedir. Alternatif yakıtlar arasında önemli bir yere sahip olan alkoller, oktan sayısının yüksek, egzoz emisyonlarının düşük seviyede olması ve bitkisel yağlar gibi yenilenebilir biyokütle kaynaklardan olmasından dolayı tercih edilmektedir (Özer ve ark., 2012; Ateş, 2021). Bu alternatif yakıtlar arasında biyodizel (BD), alkol yakıtları, hidrojen, LPG, doğalgaz ve biyogaz (BG) gibi yakıtlar bulunmaktadır.

Biyodizel, bitkisel ve hayvansal yağlardan, kullanılmış atık kızartma yağlarından bir katalizör eşliğinde kısa zincirli bir alkol ile reaksiyonu sonucunda oluşur. Başka bir ifadeyle BD, yağ asidi esterlerinin metanol veya etanol gibi kısa zincirli basit alkollerle reaksiyona girmesi ile elde edilen mono alkil esterlerdir. Biyokütleden elde edilen biyodizel, petrol esaslı dizel yakıt ile kıyaslandığında çevreye çok daha az emisyon salan yenilenebilir ve kolaylıkla biyolojik olarak parçalanabilir bir yakıttır. Ayrıca biyodizel saf olarak veya her oranda petrol kökenli dizelle karıştırılarak yakıt olarak kullanılabilirliğinden dolayı petrol kökenli dizel yakıt yerine kullanılması önerilmektedir. Saf biyodizel ve dizel-biyodizel karışımları herhangi bir dizel motoruna, motor üzerinde herhangi bir modifikasyona gerek kalmadan veya küçük değişiklikler yapılarak kullanılabilir (Fidan ve Alkan, 2014). Alt ısı değeri, yoğunluk ve viskozite değerleri gibi özellikleri dizel yakıt değerlerine çok yakındır. Ayrıca dizel yakıtına göre yağlama özelliğinin daha iyi, setan sayısının daha yüksek ve daha az toksik olması avantaj sağlayan yakıt özelliklerindendir (Akgün ve ark., 2009; Erçek Serin, 2022). Biyodizel sağladığı bu avantajlarla dizel motorda kullanılabilecek en uygun yakıtlardan biridir.

Biyogaz, bitkisel veya hayvansal atıklardan üretilmektedir. BG tesislerinde hammadde olarak biyolojik temelli atıklar, endüstriyel bazlı organik atıklar, mısır veya şeker pancarı gibi enerji bitkileri ile hayvan besiciliğinde oluşan hayvansal dışkıların oksijensiz ortamda mikroorganizmalar tarafından parçalanması ile üretilen yanıcı bir gazdır. Genellikle hayvansal ve bitkisel organik atık maddeleri yakılarak veya topraklara gübre olarak verilerek ortadan kaldırılmaktadır. Ancak yakma işleminde istenilen verim alınamamakta ve yakılan atık maddeler kullanılamaz hale gelmektedir. Bunların aksine BG teknolojisi organik atık maddelerden hem enerji eldesinde hem de anaerobik fermentasyon süreci içerisinde gübrenin erken olgunlaşmasına katkıda bulunmaktadır. Bu işlemler sonucunda ikinci defa kalan atıklar çok daha değerli bir organik gübre haline gelerek toprağa kazandırılmasına imkân vermektedir. Ayrıca

ısıtma, aydınlatma, jeneratörle elektrik üretiminde, içten yanmalı motorlarda vs. birçok sistemde kullanılabilen çevre dostu bir yakıttır.

Alkoller, sıvı fazda olmaları ve bünyelerinde yüksek düzeyde oksijen içermeleri nedeniyle uygun bir dizel yakıt katkı maddesi olarak düşünülmektedir (Kumar ve ark., 2013; Yeşilyurt, 2020). Dolayısıyla geniş uygulama alanı olan dizel motorlarda alternatif yakıt olarak kullanılan alkollerin içerisinde bulunan yüksek oranda oksijen yanma sırasında silindir içerisinde bazı bölgelerde yanmayı iyileştirdiğinden dolayı, çevreye salınan zararlı emisyonları azaltıcı yönde etkisi olacağı söylenebilir. Alkollerin yüksek gizli buharlaşma ısılarından dolayı yanma odası sıcaklığı azalmakta ve böylece NO_x emisyonlarının azalmasına neden olmaktadır (Çelik ve ark., 2017; Adin, 2019). Öte yandan bilindiği üzere uzun zamandan beri dizel motorlarında emisyonların azaltılması amacıyla alkollerin kullanım olanakları araştırılmaktadır. Yapılan çalışmalardan biri Ghadikolaei ve ark. (2018), metanol (M), etanol (E), izopropanol (Pr), n-bütanol (Bu) gibi alkol yakıtlarını dizel-biyodizel (DB) karışım yakıtına aynı oksijen, karbon ve hidrojen oranlarına sahip yakıt karışımları elde etmek için kütleli olarak belirli oranlarda eklemişlerdir. Bu yakıt karışımlarının dört silindirli ve direkt enjeksiyonlu bir dizel motorunda 1800 d/d sabit motor devrinde ve farklı motor yüklerinde kullanımlarını inceledikleri çalışmalarında, dizel ve biyodizel yakıtlarına göre karışım alkol yakıtların tutuşma gecikmesi, maksimum ısı salınımı ve özgül yakıt tüketimi değerlerinde artışlar gerçekleştiğini buna karşın yanma süresinde biraz kısalma olduğunu ve bununla beraber karışım yakıtların egzoz gazı sıcaklığı, maksimum silindir basıncı ve ısı verim değerlerinin dizel yakıtına benzer sonuçlar gösterdiğini bildirmişlerdir. Buna karşın metanol ve bütanol karışımlarının ise bu değerlerinin daha yüksek gerçekleştiğini bildirmişlerdir. Öte yandan metanol karışım yakıtı ile en yüksek ısı verim dizel yakıtından %3.5 daha fazla ve en düşük özgül yakıt tüketimi (ÖYT) dizel yakıtından %2.3 oranında daha az elde edildiğini rapor etmişlerdir. Alkol yakıtların dizel-biyodizel karışım yakıtına eklenmesiyle yük artışıyla beraber dizel ve biyodizel yakıtlarına göre CO, HC, NO_x ve duman emisyonlarında azalmalar olduğunu bununla birlikte metanol karışımli yakıtlar ile en düşük CO, HC ve duman emisyonları %23.9, %24.3 ve %80 oranlarına kadar azalmalar elde edildiğini, izopropanol karışım yakıtı ile de %19.3 dizel yakıtından daha az en düşük NO_x emisyonlarının gerçekleştiğini belirtmişlerdir. Aynı şekilde, Datta ve Mandal (2016), %5, %10 ve %15 hacimsel oranlarında etanol ve metanolün dizel yakıtına ilave edilmesiyle oluşan etanol-dizel ve metanol-dizel karışım yakıtlarını tek silindirli bir dizel motorunda 1500 d/dk

sabit hızda ve farklı yüklerde (0.5, 1, 1.5, 2, 2.5, 3, 3.5 kW) kullandıkları çalışmalarında, ısı veriminin %2.35-%2.79 ve ÖYT'nin ise %1.64-%5.99 oranlarında arttığını buna karşın maksimum silindir basıncında ise %1.83-%15.27 oranlarında azalma gerçekleştiğini belirtmişlerdir. Ayrıca %15 metanol-dizel karışımlarının ısı veriminin diğer test yakıtlarından daha yüksek olduğunu belirtmişlerdir. CO₂, NO_x, PM ve duman emisyonlarının sırasıyla %3.39, %15.96-%39.08, 32.63-%51.37 ve %27.29-%44.13 gibi önemli oranlarda azaldığını belirtmişlerdir. Öte yandan %15 etanol karışımlarının NO_x emisyonlarının daha düşük olduğunu buna karşın %15 metanol karışımlarının ise PM ve duman emisyonlarının azaltılmasında daha başarılı olduğunu vurgulamışlardır. Bu çalışmalardan çıkarılacak sonuç dizel motorlarında etanol veya metanolün çoğunlukla dizel yakıtına düşük oranlarda katılarak kullanılabildiği gibi yüksek oranlarda da kullanıldığı çalışmalar mevcuttur. Bu çalışmalarda bu alkol yakıtların dizel yakıtlarına göre yanmayı geliştirdiği ve bazı durumlarda ısı verimi artırdığı belirtilmiştir. Bununla beraber duman ve NO_x emisyonlarında çoğunlukla azalmalar rapor edilmiş olmasına rağmen CO ve HC emisyonları için hem azalma hem de artışlar bildirilmiştir. Her iki alkol yakıtın karşılaştırılmasında ise metanolün özellikle emisyon azaltmada daha başarılı olduğu anlaşılmaktadır. Etanol ve metanol ile elde edilen bu sonuçlar içeriklerindeki yakıtça zengin bölgelerde yanmayı iyileştiren yüksek oksijen miktarı (özellikle is emisyonları üzerinde etkili) ile soğutma etkisinde bulunan yüksek buharlaşma ısılarına (NO_x ve HC emisyonları açısından etkili) ve tutuşma gecikmesini dolayısıyla ön karışım yanma oranını artıran düşük setan sayılarına (performansın iyileşmesi ve duman emisyonlarının azalması üzerinde etkili) bağlanmaktadır.

Günümüzde dizel araçların sıklıkla kullanıldığı ulaştırma sektörünün karbonsuzlaştırılması çalışmaları kapsamında daha fazla çalışmanın yapılması gerekmektedir. Bu bağlamda metanolün farklı oranlarda kullanımının motor performans, emisyon ve yanma karakteristiklerinin iyileştirme yolları araştırılmaktadır. Metanol yakıtının ulaştırma sektörünün karbonsuzlaştırılması için sahip olduğu avantajlarla birlikte, yüksek oranlarda kullanılması karşısında zorluklar bulunduğu ve ayrıca metanolün hangi oranlarda ve hangi şartlarda daha iyi sonuç vereceğinin araştırılması büyük önem taşımaktadır. Bu çalışma ile dizel motorunda metanol yakıtının hangi oranlarda kullanılmasının mümkün olduğu, yanma üzerindeki etkilerinin ne olduğu ve zararlı emisyonların azaltılmasındaki başarısını ANSYS-Forte paket programı kullanılarak tespit edilmesi hedeflenmektedir.

Deneysel çalışmaların yüksek maliyet gerektirdiği, deneyi yapan kişilere bağlı olarak deney sonuçlarının değişkenlik gösterdiği ve mevsimsel şartlara bağlı olarak yılın belirli zamanlarında yapılabildiği bilinmektedir. Uzayan deney süreleri çalışmaları zorlaştırmakta, maliyeti arttırmakta ayrıca deneyleri yapan kişilerden kaynaklanan hatalara mahal vermektedir. Buna karşın sayısal çalışmalar hem süre hem maliyet olarak hem de daha nesnel sonuçlar elde etme noktasında deneysel çalışmalara nispeten daha uygulanabilir. Günümüzde araştırmacılar tarafından, sayısal çalışmalara bu sebeplerden dolayı önem verilmektedir. Yapılan çalışmada temel amaç, düşük karbonlu bir alkol olan metanol kullanılarak ulaştırma sektörünün karbonsuzlaştırılmasına katkı sağlamaktır.

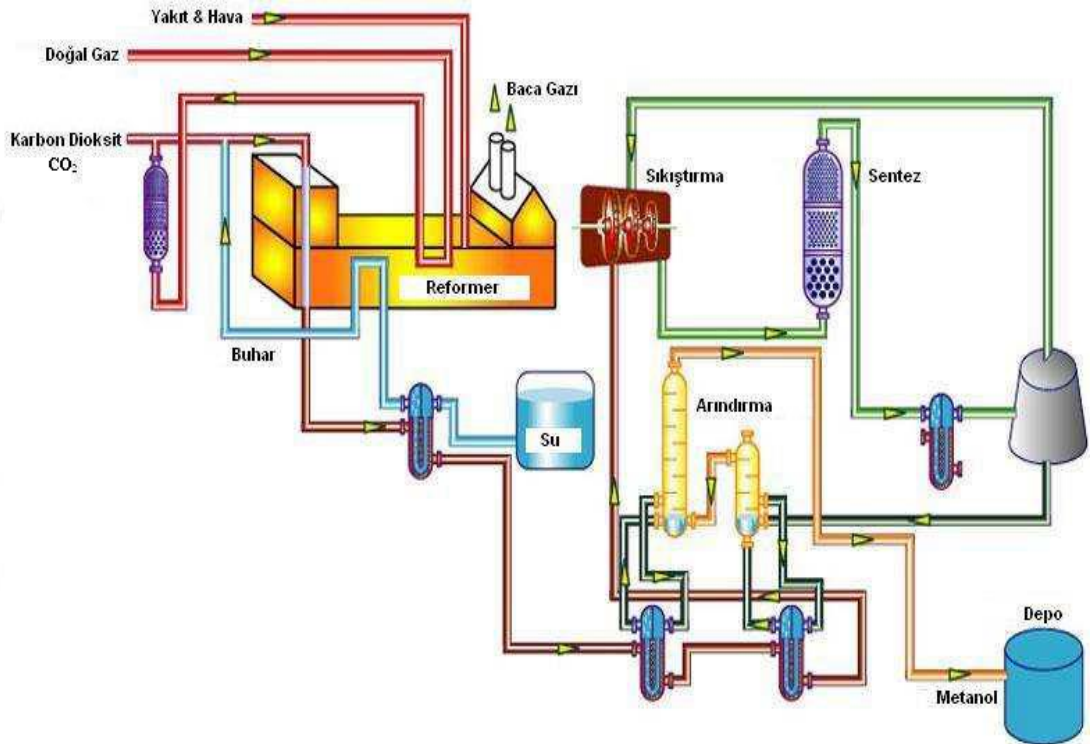
1.1. Metanol

Metanol, doğalgaz ve kömürden üretilbildiği gibi tarımsal atıklar gibi kaynaklardan hatta doğrudan yanma ürünü olarak ortaya çıkan CO₂ gazının yakalanıp işlenmesi ile elde edilebilen bir yakıttır (Yaylamlı, 2019). Bir tarım ülkesi olan Türkiye'nin tarımsal üretim potansiyelinin yüksek olması ve ayrıca, linyit rezervleri bulunması, metanol üretimini yapabileceğimizi göstermektedir. Ülkemizde olduğu gibi petrol rezervlerinin yetersiz olan ülkeler, alkolün temiz ve yenilenebilir enerji kaynaklarından elde edilebilmesi gibi avantajlarından dolayı metanol gibi alkol yakıtların kullanımını önemli ölçüde artırmaktadır. Hem fosil kaynaklardan hem de biyokütle kaynaklarından üretilen metanol, kolay ve doğal yollarla üretilmesi, çevreye fosil kökenli yakıtlara göre daha az zararlı olması, oktan sayısının yüksek olması ve içten yanmalı motorlarda kullanılabilmesi için motor yapısında herhangi bir değişiklik yapılmasının gerekmemesi gibi nedenlerle yaygın olarak tercih edilmektedir. Dizel metanol karışımı ile ilgili yapılan çalışmalarda NO_x ve HC emisyonlarında kayda değer azalmalar ve ısı veriminde artış olduğu farkına varılmıştır. Ayrıca metanol yanıcı ve yakıcı bir madde olmasından dolayı görünmez alev ile tutuşabilir. Bu özellikleri bazı araştırmacılarca avantaj sayılırken bazı kesimler için ise tehlikeli olabilir fikri yaygındır (Kulakoğlu, 2009; Bozkurt, 2021).

1.1.1. Metanol üretimi

Geçmişte odunun damıtılması ile elde edilen metanol ya da diğer bir adı odun ruhu, günümüzde karbonmonoksit ile hidrojenin yüksek basınç altında yüksek sıcaklıklara maruz bırakılması ile üretilmektedir. Doğalgaz, metanol üretiminin en çok bilinen hammaddesidir ve metanol daha çok doğalgazdan üretilmekle birlikte geri dönüştürülebilen odun, tarımsal malzemeler, biyokütle, belediye katı atıkları, evrensel atıklar gibi hammaddeler kullanılarak üretilabilmektedir. Metanol üretiminde, öncelikle hammadde gazlaştırılmasıyla sentez gaza ($\text{CO} + \text{H}_2$) dönüştürülür ve sonuçta CO ve H_2 katalitikle birleştirilerek katalizör vasıtasıyla Cu-Zn-Cr gibi metanol ürünleri çıkar (Bayraktar, 2007; Candan, 2012).

Metanol üretiminde kullanılam başka bir yöntem de düşük basınçta sentez prosesi yapılmasıdır. Hidrojen elde etmek için (%96 CH_4) doğalgaz ve oksijen elde etmek için su olmak üzere iki ana hammadde kullanılır. Şekil 1.1’de metanol üretimine ait prosesler görülmektedir. Bu hammaddeler ile bir dizi kimyasal reaksiyon zinciri sonunda arıtılmamış ham metanol üretilir ve metanol rafine edilerek % 99,9 oranında saflık sağlanır.



Şekil 1.1. Metanol üretim prosesi

Metanol üretiminde kullanılan iki ham bileşen olan doğalgaz ve su kullanılmadan önce arındırılmalıdır. Aksi takdirde mevcut kirler ısı verim düşürmekte ve sistem parçalarında hasar oluşmaktadır. Reaksiyon adımı hammadde olarak kullanılacak doğalgaz (CH_4) ve su buharı (H_2O) hidrojen (H_2), CO_2 ve CO 'e dönüşmektedir.



Metanol reaksiyonunda çevrim boyunca reaksiyona girmeyen inert gazlar oluşur.



Bu gazlar tekrar sentez reaktörüne gönderilerek sisteme tekrar kazandırılır. Bu safhadan sonra metanolün arındırma safhasına geçilir. Arındırma safhası; %68 metanol solüsyonu iki farklı adımla damıtılarak %99 saflıkta metanol üretilir (Candan, 2012).

1.1.2. Metanolün fiziksel ve kimyasal özellikleri

Kimyasal formülü CH_3OH olan metanol renksiz, çok hafif kokusu olan zehirli bir alkoldür. Metanol havada kolaylıkla yanabilen bir kimyasal olması, metanol buharı bazı ortamlarda patlayıcı olabilmesi ve zehirli bir kimyasal olduğu için de insanlarda kalıcı körlüğe sebep olabilmesi nedenlerinden dolayı dikkatli kullanılması gereken alternatif bir yakıttır. Ayrıca su ile her oranda karışabilecek yanıcı bir çözelti meydana getirebilen metanol, endüstride çözücü ve motor yakıtlarının bir bileşeni olarak geniş çapta kullanılmaktadır.

Çizelge 1.1. Metanolün fiziksel ve kimyasal özellikleri

METANOL	
Kimyasal Denklemi	CH ₃ OH
C/H oranı	0,25
Moleküler Ağırlık	32,04
Özgül Ağırlık (sıvı) (kg/dm ³)	0,79
Hava/Yakıt (kütlesel)	0,79
Isıl değeri (MJ/litre)	15,9
Tutuşma sınırları (% hacim)	6-37
Laminar alev hızı (m/sn)	0,52
Adyabatik alev sıcaklığı (° C)	1878
Kaynama noktası (° C)	65,1
Donma noktası (° C)	- 97,6
KKTS (Kendi kendine tutuşma sıcaklığı (° C))	470
Oktan sayısı (ROS)	110
Oktan sayısı (MOS)	87
Buharlaşma Isısı (MJ/kg)	1.102

Molekülde ağırlıkça karbon (C) yüzdesi % 37.49, hidrojen (H) yüzdesi % 12.58, oksijen (O) yüzdesi % 49.94'dür (Hazar ve ark., 2011; Candan, 2012). Oksijen içeriği bakımından zengin olan metanol, yanma odasında özellikle yakıtça zengin bölgelerde hidrokarbon oksidasyonunu artırarak özellikle partikül ve duman emisyonlarını azaltmakta etkili olmaktadır. Fakat oksijen miktarının artması ısı verimi düşürdüğü için motor gücünü ve termik verimi düşürmektedir (İlkılıç ve ark. 2009). Fren özgül yakıt tüketimi (FÖYT) bir saatte bir kW yararlı iş elde edebilmek için yakılması gereken yakıt miktarıdır. Bu nedenle motor yakıtlarının FÖYT'leri karşılaştırılmasında yakıtların ısı değerlerinin etkisi oldukça önemlidir. Isıl enerjisi yüksek yakıtların içerisine, ısı enerjisi düşük yakıtlar karıştırılırsa karışımların ısı enerjileri düşmekte ve FÖYT artmaktadır (Bayraktar 2005; Sekmen 2007; Özer, 2014).

Yakıtın viskozitesi, silindir içerisine püskürtülmesi sırasında damlacık çapına doğrudan etki eden faktörlerden birisidir (Hışır, 2009). Viskozite büyüdükçe yakıtın zerrelere ayrılması azalır, dolayısıyla iri yakıt zerreciklerinin nüfuzu zorlaşır (Borat ve ark., 1994). Viskozitesinin çok düşmesi ise, yakıtın atomizasyon çapını çok küçülttüğü için yakıtların püskürtülmesi sırasında silindir çıdarlarına çarpmasına sebep olmaktadır.

Ayrıca düşük viskoziteli yakıtlarda enjektörlerden püskürtme sırasında kaçaklara yol açtığı bilinmektedir (Pireli 2006; Hışır 2009; Özer, 2014).

Metanol, oktan sayısının yüksek olması ve içten yanmalı motorlarda kullanılabilmesi için motor yapısında herhangi bir değişiklik yapılmasının gerekmemesi gibi nedenlerle yaygın olarak tercih edilmektedir. Ancak alternatif bir yakıt olarak kullanılan metanolün bazı dezavantajları vardır. Bunlar; korozyon etkisinin fazla olması, setan sayısının düşük olması, yüksek ateşleme sıcaklığı ve kendi kendine tutuşma direncidir. Dizel motorlarında sıkıştırma sonuna doğru, silindir içerisindeki sıkıştırılmış hava içerisine püskürtülmesi ile başlayacak yanma sürecinde tutuşma gecikmesinin uzaması ve vuruntu gibi bazı problemler oluşturmaktadır. Metanol düşük setan sayısı, yüksek gizli buharlaşma ısısı (GBI) ve yüksek tutuşma sıcaklığından dolayı fakir ateşleme davranışına sahiptir bu nedenle uzun tutuşma gecikmesi oluşmaktadır (Bayraktar, 2007; Candan, 2012).

Bir sıvının birim kütlesinin sıvı halden gaz hale geçmesi için verilen ısıya buharlaşma ısısı denir (Çetinkaya, 1999). GBI çok yüksek olan metanol emme manifoldunda çok hızlı bir şekilde buhar fazına geçer. Buharlaşma ısısı yüksek olan metanol kullanılma şekline göre volümetrik verimi artırıcı yönde etki edebileceği bildirilmiştir.

Setan sayısının düşük olduğu bilinen alkoller, kendi kendine tutuşma sıcaklığı (KKTS)'nin yüksek olmasını sağlamaktadır. Alkol yakıtlarının KKTS'leri dizel ve benzine göre daha yüksektir. Kendi kendine tutuşma bakımından yakıtlar bulundukları ortama son derece bağımlıdır. Benzinli motorlarda kendi kendine tutuşma istenmeyen bir fiziksel etkenken, dizel motorlarda da istenilen bir fiziksel etkidir (Özer, 2014).

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Yapılan literatür araştırması neticesinde petrol kökenli yakıtlara alternatif yakıt olarak dizel motorlarında alkollerin yoğun bir şekilde araştırıldığı belirlenmiştir. Literatürde bulunan çok sayıdaki çalışmalar arasında özellikle alkollerin yüksek oranlarda test edildiği çalışmalar ile sayısal olarak incelemelerin yapıldığı çalışmalar irdelenmiştir. Bu çalışmalarda alkol olarak etil alkol en fazla üzerinde durulan alkol çeşididir. Bununla beraber metanol ve son zamanlarda bütanolün araştırıldığı birçok çalışma bulunmaktadır. Bu alkollerin kullanımında karşılaşılan en önemli sorun faz ayrışması olarak görülmektedir. Bu bölümde dizel motorlarında alternatif yakıt olarak metanolün yakıt katkısı olarak kullanımı ile motor parametrelerinde ve duman (PM) emisyonlarındaki değişimlerinin incelendiği çalışmalar sunulmuştur.

Hanedar (2021), Yaptığı çalışmada dizel yakıt, etanol, metanol, bütanol ve pirolitik kullanılarak motor performans, yanma ve egzoz emisyonlarına etkileri bir direkt enjeksiyonlu dizel motor kullanılarak test edilmiştir. Sabit 2400 dev/dk ve 3, 6, 9 ve 12 Nm motor yüklerindeki deney şartlarında yakıt karışımlarının tümü için deneyler gerçekleştirilmiştir. Deney sonuçlarına göre motorine ve pirolitik yakıtı karıştırılan alkol karışımlarının deney yakıtlarının setan sayısı, yoğunluğu, parlama noktasını, alt ısı değerini, karbon ve hidrojen içeriğini düşürürken, oksijen içeriğini ise arttırmıştır. En düşük yükte setan sayısı en düşük olan D80P10M10 yakıtıyla maksimum silindir basınç değerleri elde edilirken, en büyük setan sayısına sahip deney yakıtı olan D100 yakıtıyla genel olarak en düşük maksimum basınç değeri elde edilmiştir. Maksimum ısı salınım değerleri pirolitik alkol karışimli yakıtlarda saf dizel yakıtı göre daha yüksek değerde elde edilmiştir. Ayrıca dizel yakıtına göre % 3-15 oranında ÖYT arttığı, ısı veriminde ise %1-8 oranında düştüğü tespit edilmiştir. Emisyon değerlerinde ise CO ve CO₂ değerlerinde azalma, yük şartlarına göre NO_x emisyonunda ise değişkenlik gözlenmiştir.

Reşitoğlu (2019); yapılan çalışmada alkol türlerinin (etanol, metanol, 2-propanol, 2-bütanol) dizel yakıtı üzerine etkileri araştırılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda alternatif yakıt olarak dizel yakıtı alkol katmanın yoğunluk, viskozite, parlama noktası ve setan sayısı değerlerinde bir azalmaya yol açtığını belirtmiştir.

Adin ve ark. (2019), petrol kökenli dizel yakıtı ve biyoetanolden oluşan (BE10 ve BE15) alternatif yakıt karışımlarını dizel motorlu bir jeneratör setinde soğukta ilk çalıştırma ve ısınma sürecinde oluşan egzoz emisyonlarını test etmiştir. Deney sonuçlarına göre yüksüz durumda CO miktarında artış gözlenirken yükün arttırılmasıyla ve yakıtta biyoetanol oranı arttıkça CO miktarında azalma olduğunu tespit etmiş. Benzer şekilde yüksüz durumda en düşük HC değeri %10 biyoetanol içeren karışımda ölçülürken yükün arttırılmasıyla yine HC emisyonunda azalma görülmüş. Yüksüz durumda %15 biyoetanol içeren karışımda en düşük NO_x emisyonu ölçülmüş olup yükün artmasına ve artan biyoetanol oranına bağlı olarak NO_x değerinin azaldığını tespit etmiştir.

Feyyazbahş ve Piruzfar (2017), yaptıkları çalışmada, motor performansını arttırmak, yakıt özelliklerini iyileştirmek ve egzoz emisyonlarını azaltmak için dizel yakıtta oksijenli bir yakıt (yenilenebilir yakıt) olan metanol, etanol ve n-bütanol karıştırılarak bir dizel motorda kullanılmasını incelemektedir. Bu gözden geçirme makalesi, farklı torkların ve çeşitli motor hızlarının etkilerini incelemektedir. Motor devrinin tüm hava kirleticileri üzerinde olumsuz bir etkiye sahip olduğunu, dolayısıyla motor devrinin artmasının hava kirleticilerin azalmasına neden olduğunu göstermiştir. Bununla birlikte, motor yükü çoğu egzoz emisyonunun artmasına neden olmaktadır. Oksijenli yakıtların eklenmesi, frenin özgül yakıt tüketimini artırırken, fren termal verimini (FTV) azaltmaktadır. Bazı araştırmalarda motor performansını iyileştirmek için yakıtta nano-metal katkı maddesi kullanılmaktadır. Dizel yakıtına (küçük ısı iletkenlik katsayısına sahip bir nano metal) nano metal katkıların kullanılması durumunda motor performansının arttığı görülmektedir.

Yeşilyurt (2017), transesterifikasyon yöntemi ile sarı hardal tohumu yağından biyodizel üretilip, üretimine etki eden alkol-yag molar oranı, katalizör miktarı, reaksiyon sıcaklığı ve reaksiyon süresi parametreleri optimize edildikten sonra biyodizel veriminin en yüksek olduğu reaksiyon koşullarında üretilen biyodizel, dizel ve farklı alkoller (metanol, etanol, izopropanol, bütanol, pentanol) ile harmanlanmıştır. Ancak, metanol ilaveli yakıtlarda faz ayrışmasından dolayı deneyler gerçekleştirilememiştir. Diğer yakıtların özellikleri belirlenip, yakıtların içerisine farklı metaller yerleştirilerek korozyon karakteristikleri tespit edildikten sonra bir dizel motorda test edilerek motor performansı, yanma analizi, egzoz emisyonları, enerji ve ekserji analizleri dizel yakıtı

ile karşılaştırılmıştır. Deney sonuçlarına göre, test yakıtlarından elde edilen efektif motor torku ve efektif motor gücü değerleri dizel yakıtından daha düşük, efektif ÖYT değerleri ise daha yüksek çıkmıştır. Test yakıtlarının yanma karakteristikleri dizel yakıtınıniki ile benzerlik göstermekle birlikte alkol ilavesinin egzoz gazı sıcaklığını, duman koyuluğunu, CO, CO₂ ve NO_x emisyonlarını azalttığı ve O₂ emisyonlarını ise artırdığı tespit edilmiştir.

Lapuerta ve ark. (2008), atık yemeklik yağdan elde edilen iki farklı alkol türeviden metil ester ve etil ester biyodizel yakıtı test edilerek Bu biyodizel yakıtlar saf ve harmanlanmış (%30 ve %70 biyodizel içeriği, hacim bazında) bir common-rail enjeksiyonlu dizel motorda test edilmiştir. Dizel yakıtı referans alınıp deneysel sonuçlar saf biyodizel yakıtlar, referans yakıtla kıyasla, yakıt tüketiminde hafif bir artışa, NO_x emisyonlarında çok küçük farklılıklara ve toplam hidrokarbon emisyonlarında, duman opaklığında ve partikül emisyonlarında (hem kütle hem de sayı olarak) önemli düşüşler gözlemlenmiştir. Üretim sürecinde kullanılan alkol tipinin, toplam hidrokarbon emisyonları ve partikül madde bileşimi üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu bulunmuştur. Kullanılan alkolün daha uçucu olması nedeniyle hem hidrokarbon emisyonlarının hem de partikül maddenin uçucu organik fraksiyonunun arttığı gözlemlenmiştir.

Yusri ve ark. (2017), yapılan çalışma, birinci alifatik alkol ailesinden olan metanol, etanol, propanol ve butanol alkollerinin kullanıldığı sıkıştırma ve kıvılcım ateşlemeli motorların performansını ve emisyonlarını analiz etmektedir. Metanol, etanol, propanol ve butanol ile ilgili literatür gözden geçirilip, alternatif bir yakıt olarak uygulanabilirliğini göstermek için özetlenmiştir. Fren torku, fren gücü, FTV, FÖYT, NO, PM, CO, HC ve kurum gibi performans ve motor emisyon göstergeleri dizel ve benzin yakıtlarında ton açısından değerlendirilmiş olup, alkollü yakıtların motor performansı ve emisyonlarında farklı sonuçlar verdiğini göstermiştir. Şaşırtıcı bir şekilde, bazı araştırmalar saf dizel ve benzin yakıtlarına kıyasla alkol için olumlu sonuçlar vermektedir. Metanol, etanol, propanol ve butanolün, daha düşük motor performans özellikleri gösterebilse de egzoz emisyonlarını azaltabildiği sonucuna varılmıştır.

Kumar ve ark. (2020), Bu çalışmada, modern bir common rail direkt enjeksiyonlu (CRDI) bir dizel motorunun performans ve emisyon özelliklerini araştırmak için farklı dizel-alkol (metanol, etanol ve bütanol) karışımları kullanılmıştır. Metanol, etanol ve bütanolün saf dizel ile harmanlanmasının uygunluğunu araştırmak için emisyonlar ve partikül madde (PM) değerleri karşılaştırılmıştır. Bu çalışmada farklı motor yüklerinde (3, 6, 9 ve 12 bar BMEP) ve hızlarda (1500, 2500 ve 3500 rpm) motor deneyleri yapılmıştır. Sonuçlar, dizel yakıt kullanımının motor performansını iyileştirdiğini ve saf dizele kıyasla nispeten daha yüksek fren termal verimliliğine yol açtığını göstermiştir. Saf dizele alkollerin eklenmesi hem PM'yi hem de nitrojen oksit (NO_x) emisyonlarını azaltmıştır. Bu azalma daha yüksek motor yüklerinde belirginleşmektedir. İzosiyanik asit, formaldehit vb. gibi çeşitli düzenlenmemiş emisyon türlerinin eser konsantrasyonları, temel saf dizele alkollerin eklenmesiyle biraz artmıştır. Bununla birlikte, dizel yakıtlı motor nispeten daha düşük konsantrasyonlarda kükürt dioksit (SO_2), nitrojen oksit (NO), vb. saf dizel ile karşılaştırıldığında farklı birincil alkoller arasında metanol, diğer alkollere kıyasla NO_x ve PM emisyonlarında en önemli azalmayı ve FTV'de en önemli artışı göstermiştir. Genel olarak, saf dizele alkol, özellikle metanol ve etanol eklenmesi, orta hizmet tipi bir CRDI nakliye dizel motorunda motor performansının iyileştirilmesi ve egzoz emisyonunun azaltılması için önemli bir potansiyel göstermiştir.

Aktaş ve ark. (2019), AVL Boost v2018.1 yazılımını kullanarak %5, %10 ve %15 etanol ve metanol katkısını dört silindirli dizel bir motorda performans ve emisyonlar üzerine olan etkileri incelemişler. Yapılan analizler sonucunda %5, %10 ve %15 hacimsel oranlarındaki etanol katkısında saf dizel yakıt kullanımına göre güçte düşüş (sırasıyla maksimum %5, %4 ve %5) tespit edilirken, aynı hacimsel orandaki metanol katkılı yakıt karışımında ise bu oranlar %5, %5 ve %8 olmaktadır. Benzer şekilde NO_x oluşumunda etanol katkısı ile azalma (maksimum %25, %27 ve %28 oranları) olduğu görülürken, bu oran metanol katkısı ile %27, %28 ve %30 şeklinde gerçekleşmiştir. İs oluşumunda ise hem etanol hem de metanol kullanımında hıza bağlı olarak değişken sonuçlar elde edilmiştir.

Ning ve ark. (2020), metanol, etanol ve n-bütanol ilavesinin, direkt enjeksiyonlu, çift yakıtlı common-rail bir dizel motorun yanma özellikleri ve performansı üzerindeki etkileri incelenmiş ve ardından karşılaştırmalı bir analiz yapılmıştır. Test motoru

maksimum 2500 rpm tork hızında ve 0,75 MPa ortalama efektif basınçta (IMEP) çalıştırılıp, motor performansı, %0 (saf dizel), %10, %20, %30 ve %40 beş alkol ikame yüzdesi (AİY) kullanılarak farklı alkol/dizel yakıt karışımları için analiz edildi. Deneysel sonuçlar, saf dizel ile karşılaştırıldığında, üç alkollü yakıttan herhangi birinin dizel ile karıştırılmasıyla daha yavaş alev gelişimi ve daha hızlı alev yayılımının elde edilebileceğini göstermektedir. Artan bir AİY ile IMEP ve FTV varyasyon katsayısı azalmıştır. Çift yakıt modunda birincil alkol yakıtlarının eklenmesi toplam hidrokarbon ve nitrojen oksit emisyonlarını artırabilir, ancak karbon monoksit ve kurum emisyonlarını azaltmaktadır. Karşılaştırmalı analiz, metanol ilavesinin üç alkollü yakıt arasında en düşük efektif basınç ve en yüksek fren termal verime sahip olduğunu göstermiştir. Ayrıca metanol eklenmesi, üç alkollü yakıt arasında en düşük CO, NO_x, kurum emisyonlarını ve en yüksek HC emisyonlarını üretir.

Kuşin (2022), yaptığı çalışmada, tek silindirli bir dizel motorda dizel yakıtına biyodizel, n-bütanol ve metanol ilavesinin motor performansı ve emisyonları üzerine etkileri deneysel olarak araştırılmıştır. Deneyler dört farklı motor yüklerinde gerçekleştirilmiş olup, yapılan deneylerde test yakıtı olarak dizel, DB (%70 dizel+%30 biyodizel), DBB10 (DB+%10 n-bütanol), DBB15 (DB+%15n-bütanol), DBM10 (DB+%10 metanol) ve DBM15 (DB+%15 metanol) kullanılmıştır. Deneyler sonucunda dizel yakıtına %30 biyodizel ilavesi, DB yakıtına %10 ve %15 oranlarında ayrı ayrı olarak n-bütanol ve metanol ilaveleri, motor gücünü azaltmış, ÖYT değerini ise arttırmıştır. DBM15 yakıt karışımında güç değeri, ortalama olarak DBB15, DB ve dizel yakıtına göre daha düşük elde edilmiştir. DB (%70 dizel+%30 biyodizel) yakıt karışımı HC, CO ve is emisyonlarını azaltırken NO_x emisyonunu arttırmıştır. DB yakıt karışımına n-bütanol ilavesi, DB yakıtına göre CO emisyonlarını azaltmış NO_x emisyonlarını arttırmıştır. DB yakıt karışımına %10 ve %15 metanol ilavesi, DB yakıtına göre HC ve CO emisyonlarını arttırmış NO_x emisyonunu ise azaltmıştır. DB yakıt karışımına n-bütanol ve metanol ilaveleri tüm yüklerde is emisyonlarını azalttığı görülmüştür.

Aşağıda dizel yakıtı yakıt katkısı olarak metanolün kullanıldığı çalışmalar sunulmuştur. Fakat hangi şartlarda ve hangi oranlarda daha iyi sonuçlar verebileceğinin araştırılması büyük önem teşkil etmektedir. Bu çalışma ile dizel motorunda metanol yakıtının hangi oranlarda kullanılmasının mümkün olduğu, yanma üzerindeki etkilerinin

ne olduğu ve zararlı emisyonların azaltılmasındaki başarısının tespit edilmesi amaçlanmaktadır.

Yusaf ve ark. (2013), yaptıkları çalışmada dört zamanlı, dört silindirli bir dizel motorda dizel yakıtı %0, %10, %20 ve %30 oranlarında metanol ilave edilerek, motor gücü, tork, fren özgül yakıt tüketimi, fren termal verimliliği ve egzoz sıcaklığı üzerindeki etkileri değişken motor hızlarında deneysel olarak incelenmiştir. Yapılan deney sonuçlarına göre; metanolün farklı oranlarda dizel yakıtla karıştırılmasının motor performansı üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermiş ayrıca %10 oranında metanol ilave edilerek elde edilen karışımda en düşük egzoz sıcaklığını sergilediği ve diğer oranlarla karşılaştırıldığında çıkış gücünde yaklaşık %70'lik bir iyileşme sağladığı tespit edilmiştir. Öte yandan, kullanılan tüm karışım oranlarında frenin termal verimliliği de artmış. Ayrıca saf dizel yakıtın FÖYT diğer karışım oranlarından daha düşük çıkmıştır. Bu çalışmada dizel yakıtı %10 metanol ilavesinin motor performansı ve çevre üzerinde büyük etki yaratabileceği sonucuna varılmıştır.

Candan (2012), yaptığı çalışmada farklı oranlardaki dizel-metanol karışımının faz ayrışmasını önlemek için % 1 oranında katkı maddesi ve setan sayısını artırmak için de % 1 oranında setan arttırıcıyı farklı oranlardaki dizel-metanol karışımlarına ekleyerek tek silindirli dört zamanlı direkt enjeksiyonlu dizel bir motorun motor performansı ve egzoz emisyonlarına etkisi deneysel olarak araştırılmıştır. Standart püskürtme basıncı 175 bar olan deney motorunun püskürtme basıncı 165 bar, 170 bar, 185 bar ve 195 bar olarak değiştirilip, yapılan deney sonuçlarına göre her bir püskürtme basıncı için karışım içerisindeki metanol miktarının artmasıyla ÖYT ve NO_x emisyonlarında artma, CO, HC ve is emisyonlarında ise azalma tespit edilmiştir.

İlhan (2007), püskürtme avansının motor performansı ve egzoz emisyonlarına etkisi incelendiği bu çalışmada tek silindirli, dört zamanlı, direk püskürtmeli bir dizel motorunda %5-10-15 oranında metanol-dizel karışımları kullanılarak deneyler gerçekleştirilmiştir. Sabit devir (2200 d/d), değişken motor yükleri (5-10-15-20 Nm) ve 3 farklı avans değerinde (15°-20°-25°) gerçekleştirilen deneylerde faz ayrışmasını önlemek için yakıt tankının içine bir mikser monte edilmiştir. Deney sonuçlarına göre; motor yükü, püskürtme avansı ve karışım içerisindeki metanol miktarının artması, özgül yakıt tüketimi ve NO_x emisyonunu arttırmış, CO ve HC emisyonlarını ise

azaltmıştır. Püskürtme avansının azaltılması ile ÖYT, CO ve HC emisyonlarında artma, NO_x emisyonlarında ise azalma olmuştur.

Kulakoğlu (2009), püskürtme basıncının motor performansı ve egzoz emisyonlarına etkisinin incelendiği bu tez çalışmasında deneylerde tek silindirli, dört zamanlı, direkt püskürtmeli bir dizel motorunda metanol-dizel yakıt karışımları test edilmiştir. Deneyler üç farklı püskürtme basıncı (180, 200 ve 220 bar), sabit motor devri (2200 d/d) ve dört farklı motor yükünde (5, 10, 15 ve 20 Nm) gerçekleştirilip, % 5, 10 ve 15 oranındaki metanol-dizel yakıt karışımları kullanılmıştır. Ayrıca faz ayrışmasını önlemek için yakıt tankının içine bir karıştırıcı ilave edilmiştir. Deney sonuçlarına göre; her bir püskürtme basıncı değeri için karışım içerisindeki metanol miktarının artması ile özgül yakıt tüketimi ve NO_x emisyonlarında artma efektif verim, CO, HC ve is emisyonlarında ise azalma tespit edilmiştir. Püskürtme basıncının motorun standart (200 bar) değerinin üzerine çıkarılması ya da azaltılması durumunda ÖYT’de artma, efektif verim de ise azalma olmaktadır. Ayrıca püskürtme basıncının artırılmasıyla NO_x emisyonlarında artma CO, HC ve is emisyonlarında ise düşüş olduğu tespit edilmiştir.

Sarıdemir ve ark. (2021), yaptıkları çalışmada transesterifikasyon yöntemi ile pamuk tohumu yağından elde edilen biyodizel ve metanol kullanılarak dizel yakıt, hacimce %20 biyodizel (BD20), hacimce %20 metanol (AL20) ve türevlerinin üçlü tipi (BD20AL20) elde edilip tek silindirli bir dizel motor üzerinde, 1750 ile 3250 rpm arasında değişen motor hızlarında, 500 rpm aralıklarla deneyler gerçekleştirilmiştir. Deney sonuçlarına göre test yakıtlarının özgül yakıt tüketiminde önemli bir artış göstermiştir. Ancak termik verimde önemli bir düşüş göstermiştir. Biyoyakıt içeren test yakıtlarında, setan sayısının dizel yakıtına göre düşük olması nedeniyle maksimum silindir içi basınç ve maksimum ısı salım hızı değerleri gözlenmiştir.

Najafi ve Yusaf (2009), dört zamanlı dört silindirli bir dizel motorda alternatif yakıt olarak dizel yakıtı çeşitli oranlarda metanol ilave edilerek motor gücünü, torku, özgül yakıt tüketimini, ısı verimliliği ve egzoz sıcaklığı değerleri incelenmiştir. Dizel yakıtı %10, %20 ve %30 oranında ilave edilerek elde edilen bu karışımlar üzerinde yapılan testler sonucunda dizel yakıtın çıkış gücü ve torkunun, her oranda metanol-dizel karışimli yakıtı göre daha düşük olduğunu göstermiştir. En düşük egzoz sıcaklığını üreten en iyi karışım %10 oranında metanol içeren karışım olduğu görülmüştür. Saf

dizel yakıtın egzoz sıcaklığı, harmanlanmış yakıtın herhangi bir karışımıyla karşılaştırıldığında daha yüksek çıkmış, üç karışım oranı için FÖYT’de önemli ölçüde değişmemiş ancak en düşük değer %30 metanol-dizel yakıt karışımında elde edilmiştir. Dizel yakıtın özgül yakıt tüketimi, herhangi bir karışım oranına kıyasla çok daha düşük çıkmakla beraber metanol ve dizel karışimli yakıtlarla neredeyse tüm çalışma koşullarında fren termal verimliliğinin arttığı görülmüştür.

Cheng ve ark. (2008), yapılan çalışmada 4 silindirli doğal emişli direkt enjeksiyonlu bir dizel motorda biyodizelin %10 harmanlanmış metanol veya %10 fümigasyon metanol ile uygulanmasının etkisi karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Motor, beş farklı motor yükünde 1800 dev/dak sabit devirde çalışmaktadır. Sonuçlar CO₂, NO_x, partikül kütlesi emisyonları ve ortalama partikül çapında her iki durumda da dizel yakıtla karşılaştırıldığında azalma olduğu gözlemlenmiştir. Emülsifiye edilmiş metanol için biraz daha yüksek bir fren ve düşük motor yükünde termal verimlilik sağlarken, fümigasyon modu orta ve yüksek yüklerde motorda biraz daha yüksek fren termal verimliliği sağlamıştır. Fümigasyon modunda ekstra bir yakıt enjeksiyon kontrol sistemine ihtiyaç duyulup, ayrıca CO, HC ve NO₂ (nitrojen) miktarında da artış olduğu tespit edilmiştir.

Wei ve ark. (2016), yapılan çalışmada 6 silindirli turboşarjlı, ara soğutmalı bir dizel motor üzerinde yüksek metanol (PR_m) oranına sahip ön karışım çift yakıtlı bir dizel motorun yanma ve emisyon özellikleri araştırılmıştır. Metanol emme portundan enjekte edilip, doğrudan enjekte edilen dizel ile ateşlendi silindirde maksimum PR_m %70’in üzerindeyken deneysel sonuçlar şunu gösterdi: Yüksek PR_m ile maksimum silindir içi basıncın orta motor yükünden yüksek motor yüküne doğru arttığını, ancak düşük motor hızı ve yükünde çok az değiştiğini veya hatta azaldığını gösterdi. Ayrıca yüksek PR_m tutuşma gecikmesini uzattığı ancak yanma süresini kısalttığı ve ateşleme zamanlamasında silindir içi gaz sıcaklığını düşürdüğü görülmüştür. PR_m’nin artmasıyla HC, CO, formaldehit emisyonları ve NO₂ oranı önemli ölçüde artarken NO_x ve kuru kurum emisyonları önemli ölçüde azaldığı tespit edilmiştir.

Yaylamiş (2019), metanolün tek silindirli, direkt enjeksiyonlu bir dizel motorlarda fumigasyonu sonucunda alternatif yakıt olabilirliğinin incelendiği bu tez çalışmasında performans parametreleri ve emisyonları bakımından test edilmiştir.

Deneyler dizel motora elektronik kontrollü bir metanol enjeksiyon sistemi adapte edilip, farklı oranlarda metanol fumigasyonu uygulanarak EGR uygulamasının motor performans ve emisyonlarda oluşturduğu değişim karşılaştırmalı olarak ele alınmıştır. %20 optimum metanol fumigasyonu ve %15 optimum EGR oranı aynı anda uygulanarak performans ve emisyonlardaki değişim karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak metanol fumigasyonu efektif verimde olumlu yönde etkilerken, özgül yakıt tüketimini arttırmıştır. EGR uygulaması ise motor performansını kötü etkilerken, NO emisyonunu azalttığı görülmüştür.

Zaharin ve ark. (2017), yapılan çalışmada, alkol tipi, karışım oranı ve motor çalışma koşullarına karşılık gelen karışım biyodizel ve motorin yakıtında katkı maddesi olarak alkollü yakıt potansiyeli, yanma davranışı, performansı ve emisyon özellikleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. Bu literatür tarama çalışmasında, farklı sıkıştırma ateşlemeli motor türleri, farklı motor çalışma koşulları ve alkol-biyodizel-dizel yakıt karışım oranları çeşitleri ile önceki araştırma çalışmalarından elde edilen geniş kapsamlı sonuçlar toplanmış olup, değişim katsayısı, silindir içi basınç, tutuşma gecikmesi, ısı yayma oranı ve yanma süreleri verilmiştir. Düşük setan sayısı ve alkolün yüksek gizli buharlaşma ısısı, dizel yakıtına kıyasla daha uzun tutuşma gecikmesine neden olup, daha yüksek ısı salınım hızı ve daha düşük silindir içi basınç üretir. Alkolün düşük yoğunluğu ve viskozitesi, püskürtme özelliklerini iyileştirir ve hava-yakıt karıştırma sürecini geliştirir. Motor performans analizi açısından, alkollü yakıtta oksijen bulunması daha eksiksiz bir yanma sağladığından dolayı termal verimde bir artışa neden olur. Bununla birlikte, karbon monoksit (CO), hidrokarbon (HC) ve partikül madde (PM) emisyonlarını da azaltmaktadır.

Literatürde yapılan çalışmalar incelendiğinde genel olarak metanol içeriğinde oksijen bulundurmasından dolayı egzoz emisyonlarında ciddi oranda düşüş olduğu belirtilmektedir. Ayrıca kullanılan metanol oranına bağlı olarak dizel yakıtına göre silindir motor basıncı, fren özgül yakıt tüketiminin arttığı ve güç, tork değerlerinin ise azaldığı görülmüştür. Bunun gibi motor parametrelerinin kullanılan metanol oranına bağlı olarak artma ve ya azalmalar olduğu görülmüştür. Bu çalışmalardan elde edilen sonuç yakıtta metanol eklenmesinin yakıtın yanma ve emisyon özelliklerini iyileştirebileceğini göstermektedir.

Ma ve ark. (2021), yapılan çalışmada dizel-metanol çift yakıtlı (DMDF) motorunun metanol ve formaldehit emisyonlarını araştırmak amacıyla ayrıntılı kimyasal bir kinetik mekanizmayla birleştirilmiş bir hesaplamalı akışkanlar dinamiği(HAD) modeli geliştirilmiştir. Sonuçlar, simülasyon modelinin 41°C'de valf örtüşmesine dayanarak silindirdeki yanmamış metanol ve formaldehitin toplam metanol ve formaldehit emisyonlarının ana parçası olduğunu göstermiştir. Daha sonra farklı emme valfi açma (EVA) ve egzoz valfi kapatmanın (EVK) metanol emisyonları üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda, yalnızca EVA veya egzoz EVK'nın temizleme sırasında metanol sızıntısı üzerinde çok az etkiye sahip olduğunu gösterdi. Fakat, metanol kaçağı üzerinde büyük etkisi olan süpürme işleminin valf üst üste binmesi sırasında valf kaldırması önemli ölçüde artacaktır. Simülasyon sonuçları 6170 deniz motorunda yapılan deneylerle doğrulandı. Deneysel sonuçlar simülasyon sonuçları ve etkin akış alanının artmasıyla tutarlı olup, büyük valf örtüşmesi sırasında valf kaldırmasının neden olduğu metanol, emisyonunun artmasının en önemli nedeni olmuştur.

Datta ve Mandalı (2016), bu çalışmada motorun performansını, yanma özelliklerini, motordan farklı zararlı kirleticilerin oluşumunu ve emisyonunu tahmin etme yeteneğine sahip olan Diesel-RK adlı ticari yazılım kullanılarak yakıt olarak dizel-etanol ve dizel-metanol karışımları kullanan bir sıkıştırma ateşlemeli motorun simülasyonunu yapmışlardır. Simülasyon için düşünülen motor, tek silindirli, doğal emişli, su soğutmalı, direkt enjeksiyonlu, dört zamanlı bir dizel motordur. Simülasyon sırasında, hız ve statik enjeksiyon zamanlaması sırasıyla 1500 rpm ve 23°bTDC'de sabit tutulup, sonuçların analizine göre, dizele metanol ve etanol ilavesiyle verimlerin bir miktar arttığını ve FÖYT'nin arttığını göstermektedir. Egzozdaki zararlı kirleticilerin çoğu, CO dışında önemli ölçüde azaltılıp, alkol karışumlu yakıtların kullanımı ile NO_x emisyonundaki azalma dizel-etanol karışımında dizel-metanol karışımına göre daha fazladır. Parçacıklı madde ve duman emisyonu durumunda ise ters eğilim gözlenmiştir.

Zhang ve ark. (2021), yaptıkları çalışmada dizel motorların yanma ve emisyon özelliklerini iyileştirmek amacıyla metanol-dizel farklı karışım oranlarına (DM0, DM10, DM20, DM30 ve DM40) sahip yakıtları dört zamanlı bir dizel motorun yanması, silindir basıncı, fren gücü, frene özgü yakıt tüketimi, nitrojen oksitler ve

karbon monoksit emisyonları üzerine etkilerini araştırmışlardır. AVL-BOOST yazılımı kullanılarak yapılmış deney sonuçlarına göre; yakıt karışımındaki metanol içeriğinin artmasının performans üzerinde olumsuz etkisi olduğu ancak dizelin emisyon karakteristiği önemli ölçüde iyileştirildiği tespit edildi. Karışım yakıttaki metanol oranının %10, %20, %30 ve %40'a çıkarılmasıyla silindir motor basıncı sırasıyla %0,89, %1,48, %2,29 ve %3,17 arttığı, güç %3,76, %6,74, %11,35 ve %15,45 oranında azalırken, tork sırasıyla %3,76, %6,74, %11,35, %15,45 oranında azaldığı, fren özgül yakıt tüketimi ise sırasıyla %3,77, %6,92, %12,33, %17,61 arttığı görülmüştür. Ayrıca karışım yakıttaki metanol oranının sırasıyla %10, %20, %30 ve %40 çıkarılmasıyla, karbon monoksit emisyonu sırasıyla %21,32, %39,04, %49,81 ve %56,59 oranlarında azalma görülmüştür. Bu elde edilen deneysel sonuçlar yakıtta metanol eklenmesinin yakıtın yanma ve emisyon özelliklerini iyileştirebileceğini göstermektedir.

Yukarıda metanolün dizel motorda kullanılarak sayısal olarak incelendiği çalışmalara yer verilmiştir. Sayısal çalışmalar sayesinde hem daha kısa sürede çalışmalar yapılmakta hem de maliyetten tasarruf edilmektedir. Ayrıca deneyi gerçeğe yakın modeli oluşturularak simülasyon programları yardımıyla deneyi yaparak deneyi gerçekleştiren kişiden kaynaklanabilecek hatalar önlenmekte ve daha nesnel veriler elde edilmektedir. Yapılan çalışmalar incelendiğinde metanolün alternatif yakıt olarak kullanıldığı ve sayısal olarak incelendiği çok az sayıda çalışmaya rastlanmıştır. Alternatif yakıt olarak kullanılan metanolün hangi işletme aralığında hangi oranlarda kullanımının mümkün olabileceğinin araştırılmasının elzem olduğu belirlenmiştir.

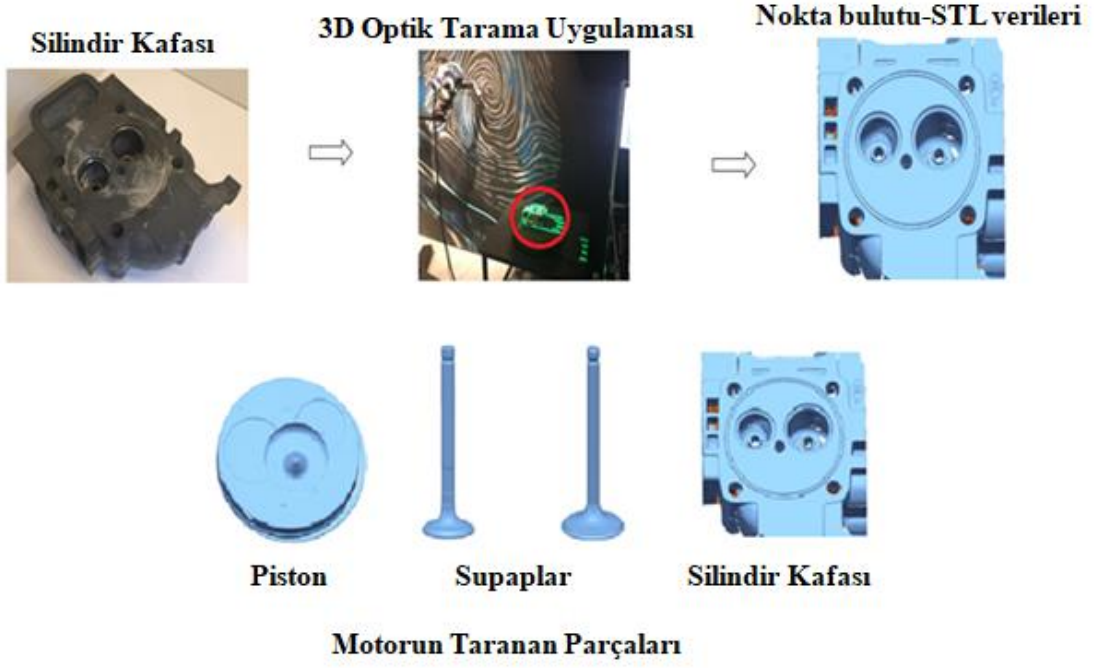
3. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu çalışmada, bir dizel motorunda metanolün yakıt olarak kullanımı sayısal olarak incelenmiştir. Çalışmada kullanılan test motorunun özellikleri Tablo 3.1’de verilmiştir. Sayısal çalışmalar ANSYS-Forte ortamında CHEMKIN-Pro çözücüsü ile gerçekleştirilmiştir.

Tablo 3.1. Test motorunun teknik özellikleri

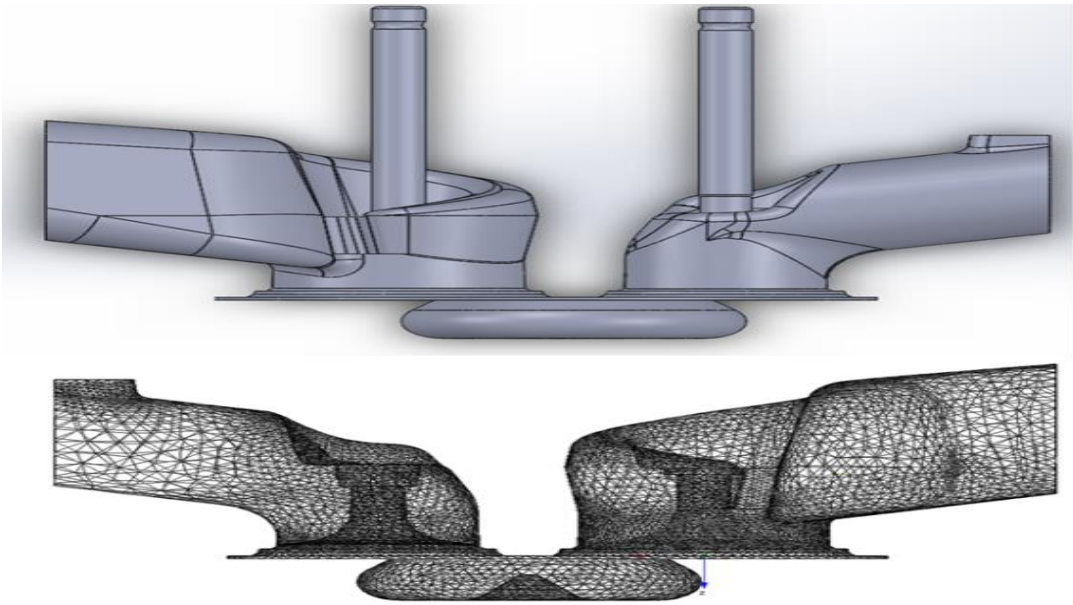
Güç çıkışı @3000 rpm	7.4kW
Maks. tork @2400rpm	25.7Nm
Enjeksiyon basıncı	300 bar
Yer değiştirme	0.406 L
Strok x Çap	86x70 mm
Sıkıştırma oranı	18.1:1

İçten yanmalı motorlardaki püskürtme dinamiği ve yanma süreçleri, yanmanın sayısal analizi için uygun geometri modellemesine büyük ölçüde bağlıdır. Bu çalışmada emme ve egzoz portlarını da içeren tam bir motor modeli kullanılmıştır. Deneyde kullanılan tek silindirli dizel motorunun taranması ve 3 boyutlu geometrik verilerin elde edilmesi için üç boyutlu (3D) tarayıcılar kullanılmıştır. Sonuç olarak gerçeğe son derece benzeyen ve doğru şekilde modellenmiş bir üç boyutlu katı motor modeli oluşturulmuştur. Şekil 3.1’de gösterildiği gibi piston, valfler, emme-egzoz portları ve silindir kapağının katı bir modeli 3D tarayıcıyla oluşturulmuştur.



Şekil 3.1. 3D tarayıcı tarafından taranan motor parçalarının katı modeli

Şekil 3.1’de bu katı modeller ayrıntılı olarak gösterilmektedir. Sayısal simülasyon çalışmaları için tam bir motor modeli oluşturulacak şekilde parçalar birleştirilmiştir (Şekil 3.2). ANSYS-Forte Simulate’e aktarmadan önce geometri geliştirildi ve ANSYS-Forte Mesh Generator kullanılarak ağ oluşturuldu. Mesh’li motor modeli Şekil 3.2’de gösterilmiştir. Mesh raporuna göre bu geometri 102329 elemana sahiptir.



Şekil 3.2. Tam motor modeli

3.1. Çözücü Ayrıntıları

Bu çalışmada ANSYS Forte kullanılarak hesaplamalı akışkanlar dinamiği simülasyonları gerçekleştirilmiştir. Türbülans, kırılma ve yanma modelleri sırasıyla Renormalizasyon Grubu (RNG) k- ϵ türbülans modeli, Kelvin-Helmholtz-Taylor (KH-RT) kırılma modeli ve G denklemi kullanılarak geliştirildi. Bu çalışmada, sayısal analiz gerçekleştirmek için kullanılan tüm alt modeller Tablo 3.2’de listelenmiştir.

Tablo 3.2. Bu çalışmada kullanılan alt modeller

Olaylar	Model
Türbülans	RNG k- ϵ
Damlacık parçalanması	Kelvin-Helmholtz / Rayleigh-Taylor Breakup
Damlacık Çarpışması modeli	Radius of influence model
Katı Koni Dağılımı	Gas-Jet
Yakıt Kimyası	Skeletal n-heptane mechanism
Yanma	G-equation
NO _x mekanizması	Extended Zeldovich mechanism
Duvar kanunu	Wall model

Dizel yanması 35 tür içeren iskelet dizel mekanizması kullanılarak modellenirken, benzin-izo-oktan yanması 178 tür içeren indirgenmiş mekanizma kullanılarak modellenmiştir. Kimya seti dosyalarını kullanan CHEMKIN yazılımı, motorun yanma kimyasını değiştirmek için kullanıldı. Deneyde kullanılan yakıtların kimyasal, termodinamik ve termofiziksel özellikleri kullanılan yakıtlara göre düzenlenmiştir. Silindir içi NO_x oluşumunun tahmin için bu çalışmada yakıt yanma kimyasında genişletilmiş Zeldovich mekanizması kullanılmıştır.

3.2. Çalışma Koşulları

Mevcut araştırma sırasıyla 2400 rpm ve 5,1 Nm’de çalıştırılan tek silindirli 4 zamanlı dizel motor üzerinde gerçekleştirilmiştir. Piston yüzey sıcaklığı 600K, duvar sıcaklığı ise 550K olarak ayarlanmıştır. Sırasıyla 1,05 bar ve 303K giriş basıncı ve sıcaklığı korunmuştur. Tüm simülasyon durumları Intel Xeon® işlemcili bir Dell precision Tower 7810 iş istasyonunda sayısal olarak çözülmüştür. Sıkıştırma strokunun başlangıcındaki hesaplama ağı Şekil 3.2’de gösterilmektedir. Dizel yakıt (EN590) ve

metanol içeren karışım yakıtlar doğrudan silindire püskürtülür. Tablo 3.3'te test yakıtlarının özelliklerini göstermektedir. Çalışmada öncelikle dizel yakıtı kullanılmış ve referans olabilecek ve karşılaştırma için kullanılacak sonuçlar elde edilmiştir. Daha sonra Dizel yakıtına hacimsel olarak %10 (M10), %20 (M20) ve %30 (M30) oranlarında metanol eklenerek testler tekrarlanmıştır. %10 eklenmiş test yakıtı için ayrıca avans değeri 3 °KA azaltılarak Üst Ölü Noktadan Önce (ÜÖNÖ) 18 °KA ve 15 °KA değerlerinde de testler tekrarlanmıştır. Tablo 3.4 sayısal simülasyonlar için ayrıntılı çalışma koşullarını göstermektedir.

Tablo 3.3. Dizel ve metanolün fiziksel ve kimyasal özellikleri (İlhan, 2007; Demirdağ, 2023)

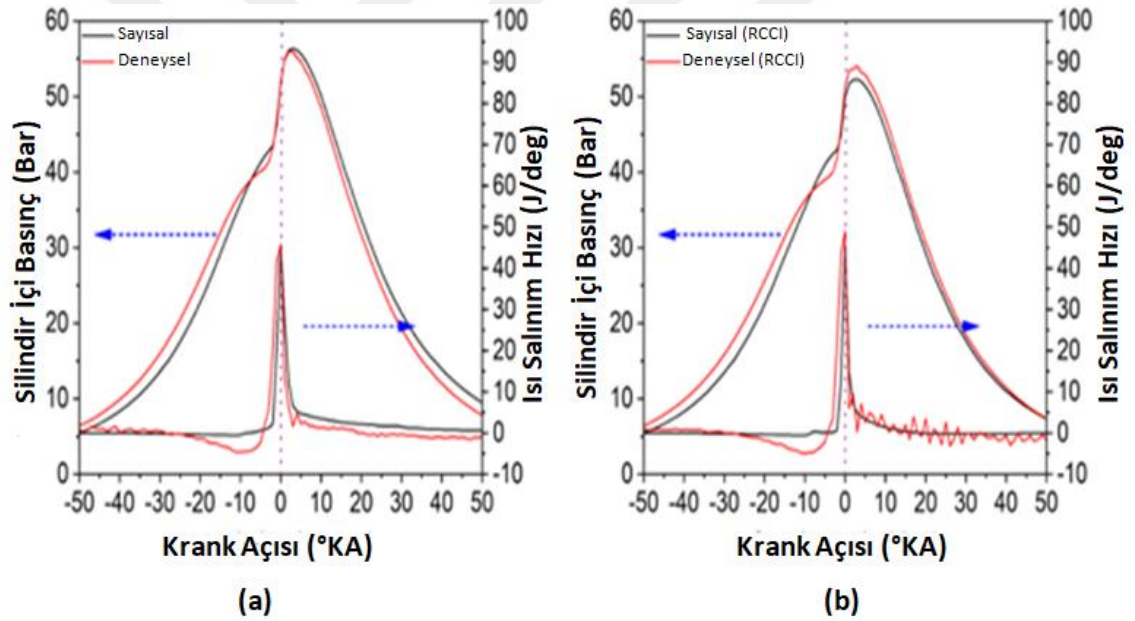
Özellikler	Dizel	Metanol
Moleküler Formül	$C_{12}H_{26}-C_{14}H_{30}$	CH_3OH
Moleküler Ağırlık (kg/kmol)	170-198	32,04
Yoğunluk (kg/m ³)	830	794
Kaynama Noktası (°C)	190-280	65,1
Viskozite (mPa.s, 40°C'de)	1,75	0,58
Isıl Değeri (MJ/kg)	43	20,1
Gizli Buharlaşma Isısı (kJ/kg)	620	1167,7
Tutuşma Sıcaklığı (K)	300-340	470
Karbon İçeriği (%)	80.13	37,49
Hidrojen İçeriği (%)	12.86	12,58
Oksijen İçeriği (%)	6.35	49,94
Oktan Sayısı (ROS)	-	110
Setan Sayısı	55	3
Adyabatik Alev Sıcaklığı (C)	2054	1878
Stokiyometrik Hava/Yakıt Oranı	14,7	7,14

Tablo 3.4. Çalışma parametreleri

Parametreler	
Motor yükü (Nm)	5.1
Motor hızı (rpm)	2400
Dizel enjeksiyon basıncı (bar)	300
Dizel enjeksiyon zamanlaması (°KMA bTDC)	21

3.3. Mesh Bağımsızlığı ve Model Doğrulama

Daha doğru sayısal sonuçlar elde etmek amacıyla bu çalışmada üç farklı eleman numarasına sahip ağ yapısı değerlendirilmiştir. Sayısal sonuçlarla karşılaştırmanın ölçütü, test motorunun deneyinden elde edilen verilerdir. Hem silindir içi basınç hem de ısı salınım hızı (ISH) için daha yakın sonuç sağlanmasının yanı sıra 102329 eleman numaralı bir ağ yapısı tercih edildi. Silindir içi basınç ve ısı salınım hızı değişimleri, motor simülasyonlarını doğrulamak için kullanılan önemli özellikleridir. Dolayısıyla bu bulgular sayısal simülasyon sonuçlarını doğrulamak için kullanıldı. Aynı koşullar altında silindir basıncı ve ISH ile krank açısının deneysel ve sayısal sonuçları Şekil 3.3'te gösterilmektedir. Sayısal çalışmanın sonuçlarının deneysel çalışmanın sonuçlarıyla iyi bir uyum içinde olduğu görülmektedir.



Şekil 3.3. Hem geleneksel hem de RCCI yanma modu için simülasyon sonuçlarının deneysel sonuçlarla doğrulanması

Hem ağ yapısı testleri hem de seçilen kimyasal kinetik mekanizma sonucunda, Şekil 3.3'te görülebileceği gibi sayısal ve deneysel veriler arasında yüksek derecede bir uyum elde edilmiştir. Silindir içi basınç için deneysel ve sayısal sonuçlar arasında maksimum %3,14'lük bir fark elde edildi. Üstelik kritik yanma bölgesi çevresinde (yaklaşık $\pm 15^\circ\text{KA}$) fark %1'den azdır. Benzer şekilde, ısı salınım oranı sonuçlarındaki

fark da %3'ten azdır. Bu durum veri uyumluluğu ve sayısal sonuçların doğruluğu açısından yüksek düzeyde performans elde edildiğini göstermektedir.

Deneyde kullanılan tek silindirli dizel motorun taranması ve üç boyutlu geometrik verilerin elde edilmesi için üç boyutlu tarayıcılar kullanılmıştır. 3D tarayıcılarla piston, valfler, emme-egzoz portları ve silindir kapağının katı bir modeli oluşturulmuştur. Sayısal simülasyon çalışmaları için tam motor modeli oluşturulacak şekilde parçalar birleştirilmiştir. Daha sonra ANSYS-Forte Mesh Generator kullanılarak ağ oluşturuldu. Mesh'in amacı, karmaşık olan bir hacmi simülasyonun çalışabileceği şekilde küçük parçalara bölmektir. Motorun kıvrımlı olan yüzeylerinde mesh uygulamasının daha sık bir şekilde uygulanmasının sebebi analiz sonuçlarında daha detaylı ve hassas bir sonuç elde edebilmektir. Türbülans, kırılma ve yanma modelleri sırasıyla Renormalizasyon Grubu (RNG) k- ϵ türbülans modeli, Kelvin-Helmholtz-Taylor (KH-RT) kırılma modeli ve G denklemi kullanılarak geliştirildi. CHEMKIN yazılımı kullanılarak deneylerde kullanılan yakıtların fiziksel ve kimyasal özellikleri belirlendi. Mevcut araştırma sırasıyla 2400 rpm ve 5,1 Nm'de çalıştırılan tek silindirli 4 zamanlı dizel motor üzerinde gerçekleştirilmiştir. Çalışmada öncelikle dizel yakıtı kullanılmış ve referans olabilecek ve karşılaştırma için kullanılacak sonuçlar elde edilmiştir. Daha sonra dizel yakıtına hacimsel olarak %10 (M10), %20 (M20) ve %30 (M30) oranlarında metanol eklenerek testler tekrarlanmıştır. %10 eklenmiş test yakıtı için ayrıca avans değeri 3 °KA azaltılarak ÜÖNÖ 18 °KA ve 15 °KA değerlerinde de testler tekrarlanmıştır.

4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

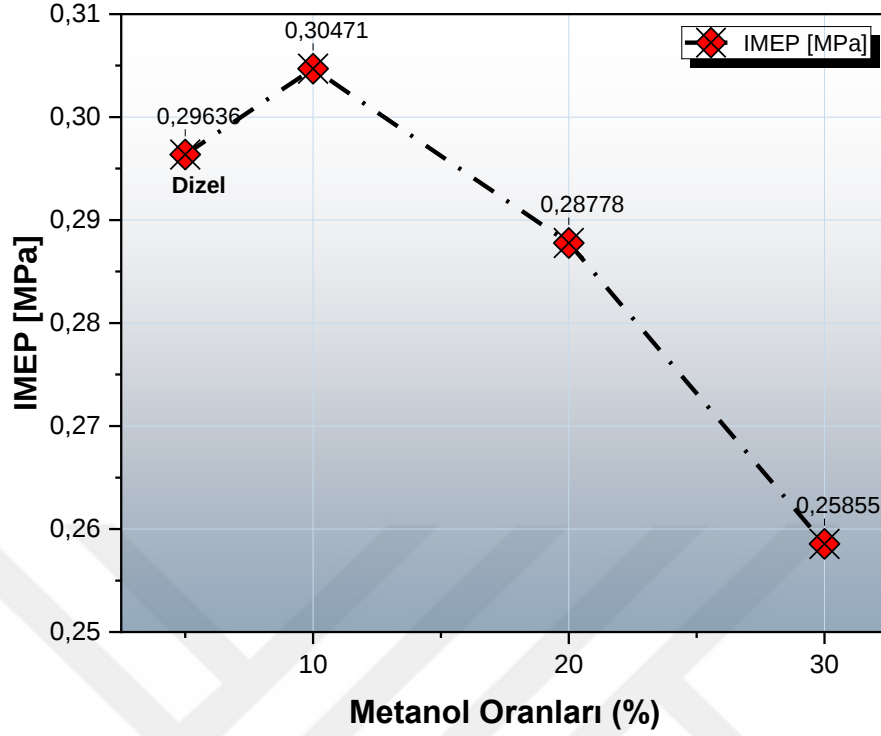
Bu bölümde farklı metanol oranlarındaki (M10, M20, M30) yakıtların ÜÖNÖ 21° KA püskürtme avansı değerinde ve M10 (%10 Metanol + %90 Dizel) yakıtının farklı püskürtme avanslarında (ÜÖNÖ 15° KA, 18° KA, 21° KA) test edilmeleri sonucu elde edilen yanma, performans ve egzoz emiyonu değerleri grafikler haline getirilerek sunulmuştur.

4.1. Farklı Metanol Oranlarındaki (M10, M20, M30) Motor Performansı

Şekil 4.1’de dizel yakıtı ve farklı metanol oranına sahip yakıtların efektif basınç değerleri görülmektedir. Grafiğe göre en yüksek efektif basınç değeri M10 yakıtından elde edilmiştir. Ayrıca başta dizel yakıtına %10 oranında metanol ilavesi efektif basıncı % 2,81 oranında arttırırken, yakıttaki metanol oranının daha da arttırılmasıyla efektif basınç değeri düşmüştür. M20 ve M30 yakıtlarının efektif basınç değerleri dizel yakıtı oranla sırasıyla %3,1 ve %14,7 oranlarında düşüş olmuştur. Örneğin; M10 yakıt karışımında efektif basınç 0.304 MPa iken, M20 ve M30 yakıtlarında ise sırasıyla 0.287 MPa ve 0.258 MPa’dır. Saf dizel yakıtında ise efektif basınç değeri 0.296 MPa olarak ölçülmüştür.

Benzer şekilde Atmanlı (2013), dizel yakıtı-alkol-bitkisel yağ karışımlarının motor karakteristiklerine etkisini incelediği çalışmasında üçlü karışım içerisindeki n-bütanol oranının %40’tan yüksek olduğu tüm karışımlarda , ortalama efektif basınç değerlerinde büyük oranda düşüş olduğu görülmüştür. Bu düşüşün nedeni n-bütanolün yüksek gizli buharlaşma ısısı ve düşük ısıl değerine bağlı olduğu ifade edilmiştir.

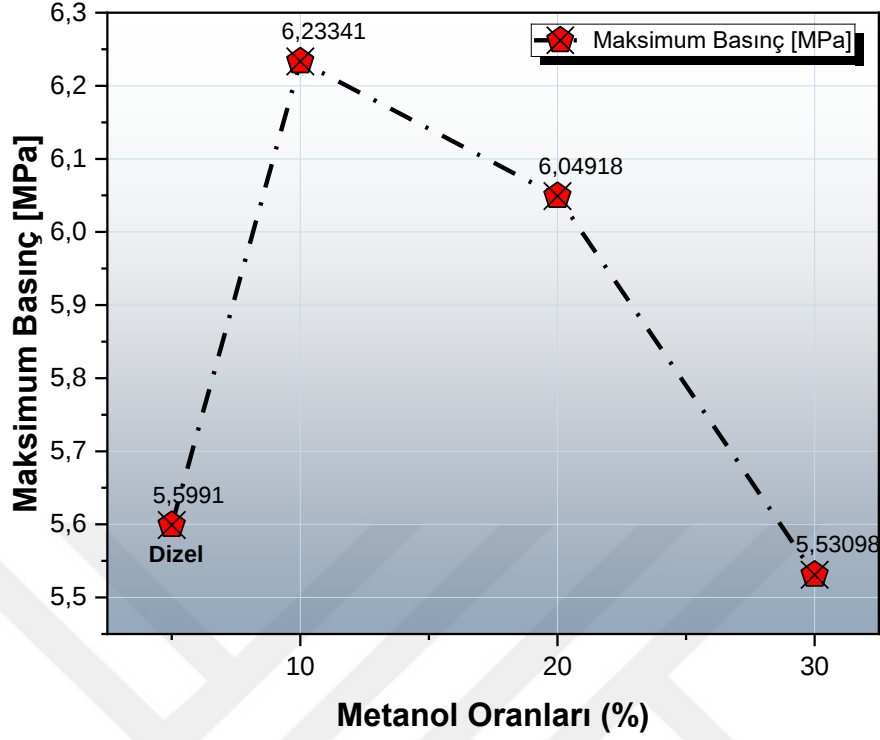
Karışım yakıtındaki metanol oranı arttıkça efektif basınç değerlerinin düşmesinin sebebi, metanolün ısıl değerinin (20,1 MJ/kg) dizel yakıttan (43 MJ/kg) daha düşük olması, gizli buharlaşma ısısının (1167 kJ/kg) dizel yakıttan (620 kJ/kg) yüksek olması, viskozite ve yoğunluk değerlerinin de dizel yakıtından düşük olmasından dolayı yanmayı kötüleştirmesinden kaynaklandığı söylenebilir.



Şekil 4.1. DY (dizel yakıtı) ve M10, M20, M30 yakıtlarının efektif basınç değerlerindeki değişimler

Farklı metanol oranına sahip (M10, M20, M30) yakıtların maksimum basınç eğrileri Şekil 4.2’de görülmektedir. Şekil 4.2’ye göre başta dizel yakıtına %10 oranında metanol eklenmesi maksimum basıncı %11,4 oranında artırırken, metanol oranının daha da artırılması maksimum basınç değerlerinde düşüşe neden olmuştur. Maksimum basınç M10 yakıtında oluşmaktadır. Örneğin; M10 yakıtının maksimum basıncı 6.23 MPa iken, M20 ve M30 yakıtlarından elde edilen maksimum basınç değeri ise sırasıyla 6.04 MPa ve 5.53 MPa’dır. Dizel yakıtında ise bu değer 5.59 MPa olarak ölçülmüştür.

Metanol yakıtı gibi setan sayısı düşük olan yakıtların tutuşma gecikmesi süresinin daha uzun olduğu bilinmektedir. Tutuşma gecikmesinin uzaması, silindir içerisine püskürtülen yakıtın birikmesine ve ani bir şekilde yanmasıyla maksimum sıcaklık ve basınç oluşması beklenir. Ejder (2007), maksimum basıncı tutuşma gecikmesinin tayin ettiğini ifade etmiştir. Ancak metanolün setan sayısı dizel yakıttan daha düşük olmasına rağmen metanol oranının artması ile maksimum basıncın düşmesinin nedeni ısı değeri düşük ve gizli buharlaşma ısılarının yüksek olmasına bağlı olarak yanma odasından daha fazla ısı çekmesiyle yanma sonu maksimum sıcaklığı ve basıncında düşüş olduğu düşünülmüştür.



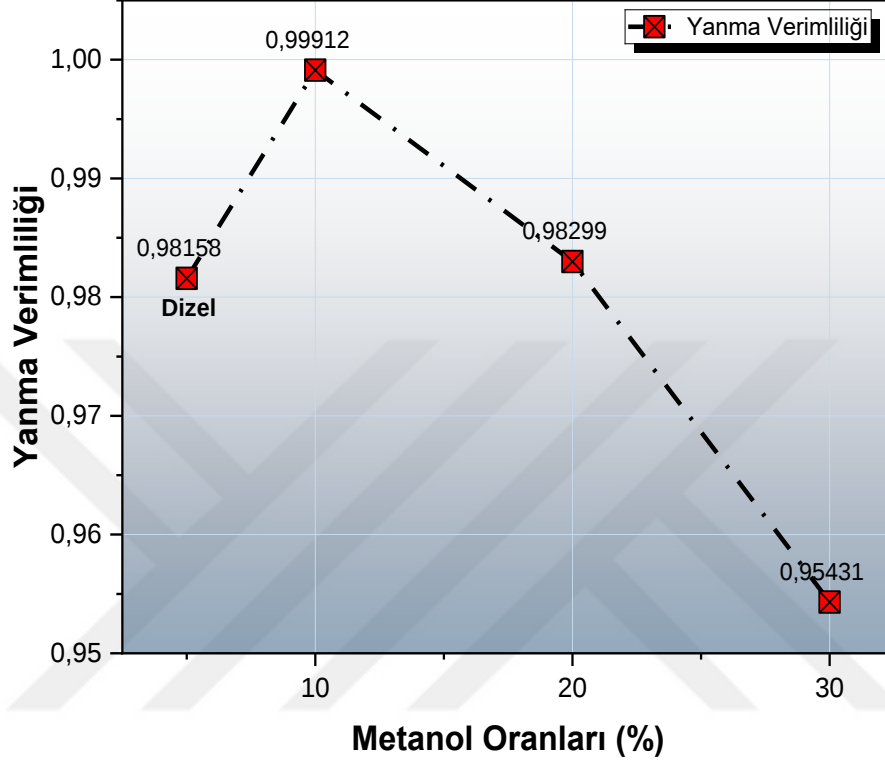
Şekil 4.2. DY ve M10, M20, M30 yakıtlarının maksimum basınç değerlerindeki değişimler

Şekil 4.3'te M10, M20 ve M30 yakıtlarının yanma verimliliği değerleri görülmektedir. En yüksek yanma verimliliği M10 yakıt karışımından elde edilmiştir. Yakıtlarda artan metanol oranına bağlı olarak yanma verimliliğinin düştüğü tespit edilmiştir. Örnek olarak; %10 metanol içeren M10 yakıtının yanma verimliliği değeri 0.999 iken, %20 ve %30 metanol içeren M20 ve M30 yakıtlarının yanma verimliliği değerleri sırasıyla 0.982 ve 0.954'tür. Dizel yakıtta ise bu değer 0.981 olarak ölçülmüştür.

Yakıtta metanol oranının artışına bağlı olarak yanma verimliliğinin düşmesini sebebi, metanol yakıtının ısı değeri dizel yakıtından daha düşük olması ve metanolün viskozite değerinin (0,58 mPa s, 40°C) dizel yakıtı (1,75 mPa s, 40°C) oranla çok daha düşük olmasından dolayı püskürtme karakteristiklerinin kötüleşmesi ve böylece yanma veriminin düşmesine neden olduğu düşünülmektedir. Ayrıca metanolün çok düşük setan sayısına sahip olması da yanma verimliliğini etkileyen önemli bir parametredir.

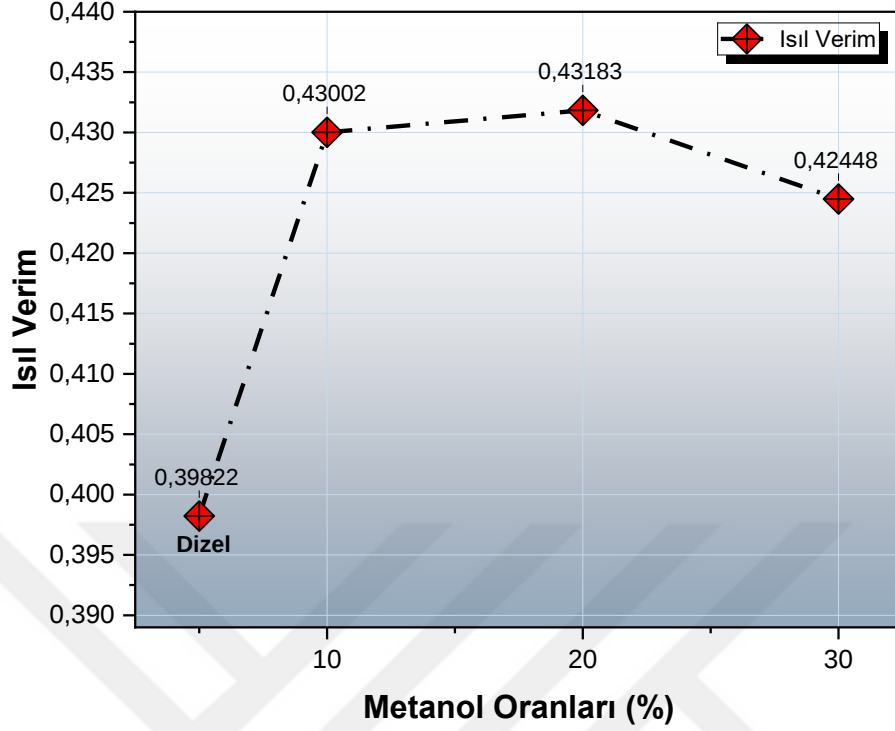
Benzer şekilde Örs (2016), biyodizel-bütanol karışımlarının motor performansına ve egzoz emisyonlarına etkisini incelediği çalışmasında, bütanolün setan sayısının düşük olması nedeniyle tutuşma gecikmesini daha fazla arttırdığı ve verimde

azalma olduğu aktarılmıştır. Ayrıca bütanolün buharlaşma ısısının yüksek olması da yanma sıcaklığını düşürmekte bu da verimi olumsuz yönde etkilediği ifade edilmiştir.



Şekil 4.3. DY ve M10, M20, M30 yakıtlarının yanma verimliliklerindeki değişimler

M10, M20 ve M30 yakıtlarının ısı verim değerleri Şekil 4.4'te görülmektedir. En yüksek ısı verim M20 yakıtından elde edilmiştir. Metanol içeren M10, M20 ve M30 yakıtları dizel yakıtı oranla ısı verim değeri sırasıyla %8, %8,2 ve %6,53 oranlarında daha yüksek çıkmıştır. Fakat metanol oranının artırılmasıyla başta ısı veriminde bir miktar artış olmuştur ancak metanol oranının daha da artırılması ısı veriminde düşüşe neden olmuştur. Örneğin; saf dizel yakıtının ısı verim değeri 0.398 iken, dizel yakıtına %10, %20 ve %30 oranında metanol eklenmesiyle ısı verim değerleri sırasıyla 0.430, 0.431 ve 0.424'tür.



Şekil 4.4. DY ve M10, M20, M30 yakıtlarının ısı verimlerindeki değişimler

4.2. Farklı Metanol Oranlarındaki (M10, M20, M30) Egzoz Emisyonları

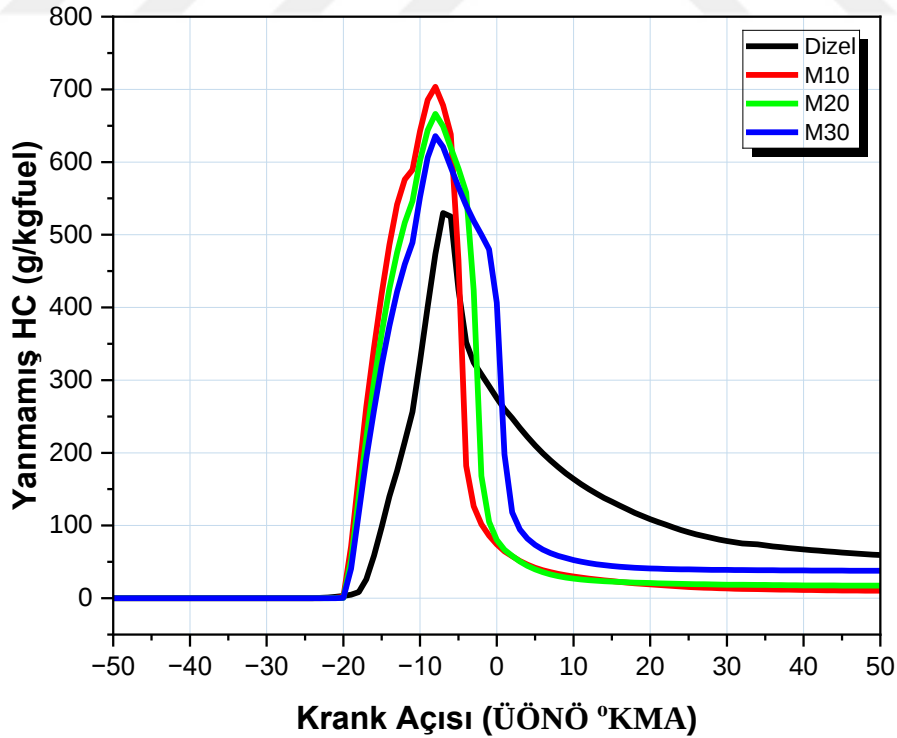
Hidrokarbon emisyonları yakıtın tam yanmaması sonucu oluşurlar. Yakıtın setan sayısı, viskozite, buharlaşma ısı ve içerdiği oksijen miktarı yanmamış HC emisyonlarını etkileyen önemli parametrelerdir. Ayrıca dizel motorun çalışma koşulları ve yanmanın kalitesi de yanmamış hidrokarbonları etkileyen faktörler arasındadır.

Şekil 4.5'te M10, M20 ve M30 yakıtlarının krank açısına bağlı olarak yanmamış hidrokarbon emisyon değerleri görülmektedir. Şekile göre en düşük yanmamış hidrokarbon değeri dizel yakıtında elde edilmiştir. Bunun sebebi, saf dizel yakıtın setan sayısının metanol yakıtına göre yüksek olması ve yanma kalitesini iyileştirmesidir. Bir başka sebep ise, dizel yakıtın buharlaşma ısı (620 kJ/kg) metanol yakıtına (1167,7 kJ/kg) göre düşük olduğundan dolayı buharlaşma süresi metanol yakıtına göre daha kısa sürede olur. Tutuşma gecikmesi kısaldı, yakıtın yanması daha uzun sürede gerçekleşir. Bunun sonucunda eksik yanma ürünü olan HC emisyonları daha düşük miktarda oluşur. Bununla beraber metanol kullanımında yüksek buharlaşma ısılarından dolayı ortam

sıcaklığını düşürücü yönde etki ettiğinden, yanmamış HC emisyonlarında bir artış olduğu görülmektedir.

Öte yandan yakıtta metanol oranının artırılmasıyla yanmamış hidrokarbon emisyonunun düştüğü tespit edilmiştir. Örneğin; M10 yakıtının yanmamış HC değeri 703,45 g/kgfuel iken, M20 ve M30 yakıtlarında ise bu değer sırasıyla 666,33 g/kgfuel ve 635,82 g/kgfuel olarak ölçülmüştür. Yanmamış HC emisyonlarının metanol oranının artmasına bağlı olarak azalmasının sebebi metanolün yapısında oksijen miktarının yüksek olmasından dolayı daha kaliteli bir yanma gerçekleşmesinden kaynaklandığı söylenebilir.

Benzer şekilde Uslu (2006), etanol ile ilgili yaptığı çalışmadan elde ettiği deney sonuçlarına göre, etanol oranı artışına bağlı olarak HC emisyonlarının azaldığını tespit etmiştir. Bunun nedeni etanol içindeki karbon miktarının düşük olması ve yapısında oksijen bulundurmasına bağlı olarak yanma kalitesinin iyileşmesinden kaynaklandığı aktarılmıştır. Dolayısıyla oksijen konsantrasyonunun artması ile HC emisyonları azalma olduğu ifade edilmiştir.

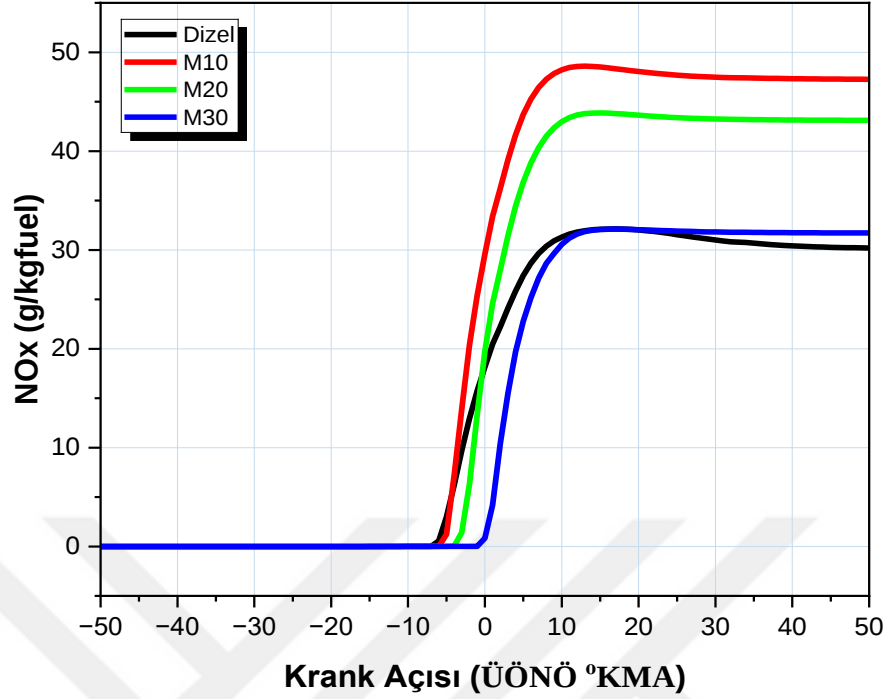


Şekil 4.5. DY ve M10, M20, M30 yakıtlarının yanmamış HC emisyonlarındaki değişimler

Silindir içine alınan havanın içinde yüksek oranda azot (N_2) bulunmaktadır. Fakat azot inert bir gaz olduğu için tepkimeye katılabilmesi için yüksek miktarda enerjiye ihtiyaç duyar. Silindir içerisinde yanma sonucunda yüksek oranda basınç ve sıcaklığa ($1600^{\circ}C$ 'nin üstünde) maruz bırakılan azot atomları arasındaki güçlü bağlar kırılır, oksijenle tepkimeye girerek NO_x emisyonlarını oluşturur.

Şekil 4.6' da üç farklı metanol oranına sahip yakıtın NO_x değerleri dizel yakıt ile kıyaslanmıştır. Şekilde en düşük NO_x emisyon değeri dizel yakıt ve metanolün dizel yakıtta %30 oranında karıştırılarak test edildiği yakıttan elde edilmiştir. Ayrıca şekilden de anlaşıldığı gibi yakıtlardaki metanol oranının artırılmasıyla NO_x emisyonlarında düşüş olduğu kaydedilmiştir. Örneğin; M10 yakıtından elde edilen NO_x değeri 48,59 g/kgfuel olarak ölçülürken, M20 ve M30 yakıtlarında ise 43,85 g/kgfuel ve 32,10 g/kgfuel olarak elde edilmiştir. Bilindiği üzere metanol yakıtının gizli buharlaşma ısısı (1167,7 kJ/kg) dizel yakıtı (620 kJ/kg) göre çok yüksektir. Gizli buharlaşma ısısı yüksek olmasından buharlaşırken ortamdan ısı çekmektedir. Bunun sonucunda silindir içerisindeki ısıyı düşürücü etkisinden dolayı NO_x emisyonlarını azaltıcı yönde etki etmektedir. Ayrıca, metanolün yoğunluk, viskozite ve ısıl değerinin dizel yakıtından düşük olması sebebiyle silindir içerisindeki yanma sonu sıcaklığına doğrudan etki ettiği söylenebilir. Dolayısıyla yakıttaki artan metanol oranına bağlı olarak NO_x emisyonları azalmaktadır.

Benzer şekilde Bayık (2010), izobütanolü dizel yakıt katkısı olarak kullandığı çalışmada motor performans ve emisyonlara etkisini incelemiştir. Karışım yakıtı içerisindeki izobütanol miktarının artmasına bağlı olarak NO_x emisyonunda azalma olduğu tespit edilmiştir. Oksijen bakımından zengin ve düşük enerji içeriğine sahip olan yakıt karışımları genellikle yanma sonu sıcaklıklarının düşmesine neden olurduğu ifade edilmiştir. Dizel yakıtının içerisine ilave edilen izobütanolün ısıl enerjisinin, yoğunluğunun ve viskozitesinin standart dizel yakıtına göre düşük olması nedeniyle silindire daha az yakıt verilmesi yanma sonu sıcaklığını düşürmektedir. Ayrıca izobütanolün dizel yakıtına oranla buharlaşma ısısının yüksek olmasına bağlı olarak dizel yakıtına katılan karışım miktarı arttıkça silindir içerisinde daha fazla ısı çekilmesi yanma sonu sıcaklığını ve basıncını düşürmekte, bunun da NO_x emisyonlarında azalma olmasına neden olduğu ifade edilmiştir.

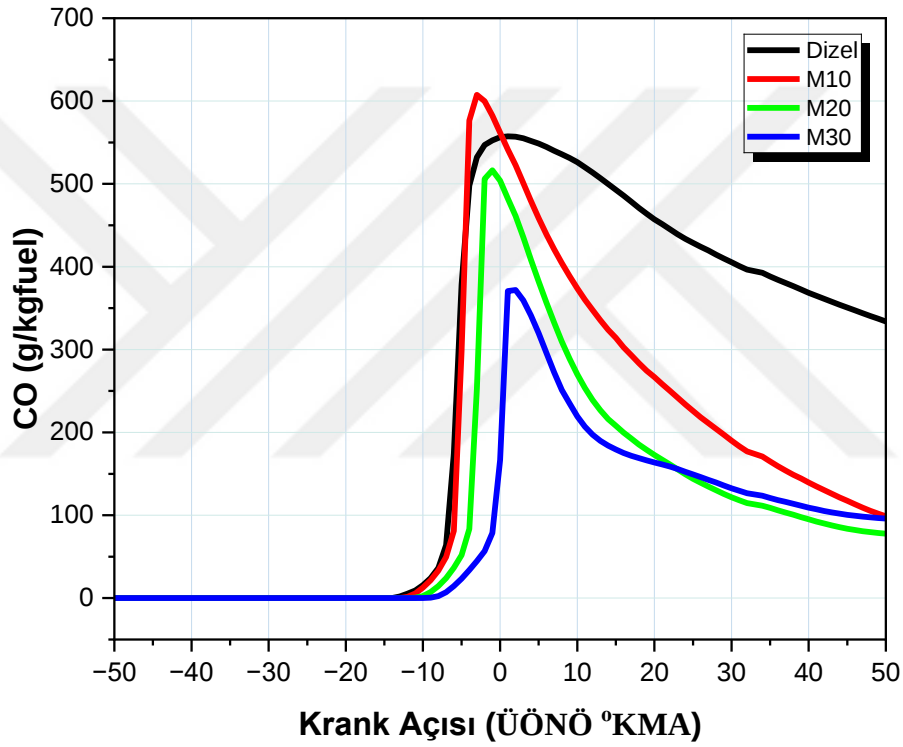


Şekil 4.6. DY ve M10, M20, M30 yakıtlarının NO_x emisyonlarındaki değişimler

CO emisyonu genellikle yanma odasında oksijen yetersizliğinden kaynaklanmaktadır. M10, M20 ve M30 yakıtlarının CO emisyon değerleri dizel yakıtla krank açısına bağlı olarak kıyaslaması şekil 4.7’de görülmektedir. Şekile göre en yüksek CO emisyon değeri M10 yakıtından elde edilmiştir. Ayrıca yakıttaki metanol oranının artırılmasıyla beraber CO emisyonlarında düşüş olduğu gözlenmiştir. M10 yakıtından oluşan CO değeri 607,38 g/kgfuel iken, M20 ve M30 yakıtlarında ise bu değer 516,49 g/kgfuel ve 371,93 g/kgfuel olarak ölçülmüştür.

CO değerinin metanol oranının artırılmasıyla düşmesinin sebebi, metanol yakıtının yapısında yüksek miktarda oksijen bulundurmasından dolayı tam yanma gerçekleşmektedir. Metanol yakıtı içeriğinde yüksek oranda oksijen bulundurduğu için de karbon atomları yeteri kadar oksijen bulup, CO₂’ye dönüşür. CO emisyon değerinin düşük çıkmasının diğer bir sebebi ise, düşük karbon oranına sahip olmasından kaynaklandığı söylenebilir. Ayrıca metanol yakıtının stokiyometrik hava/yakıt oranı (7,14) dizel yakıtından (14,7) daha düşük olduğundan dolayı yakıt yanması için daha az oksijene ihtiyaç duyar.

Özer (2010), bütanol kullanımının dizel motor performans ve egzoz emisyonlarına etkisini incelediği çalışmada, standart dizel yakıtının içerisine 2-bütanol ilavesiyle CO emisyonlarda azalma olduğunu tespit etmiştir. CO emisyonlarındaki bu iyileşmenin temel sebepleri arasında; 2-bütanolün karbon (C) miktarının dizel yakıtına göre az olması ve bu tür alkollü yakıtların yapısındaki oksijeni yanma sırasında silindir içerisine salarak karbonların tam yanmasının arttırması ile açıklanmıştır.



Şekil 4.7. DY ve M10, M20, M30 yakıtlarının CO emisyonlarındaki değişimler

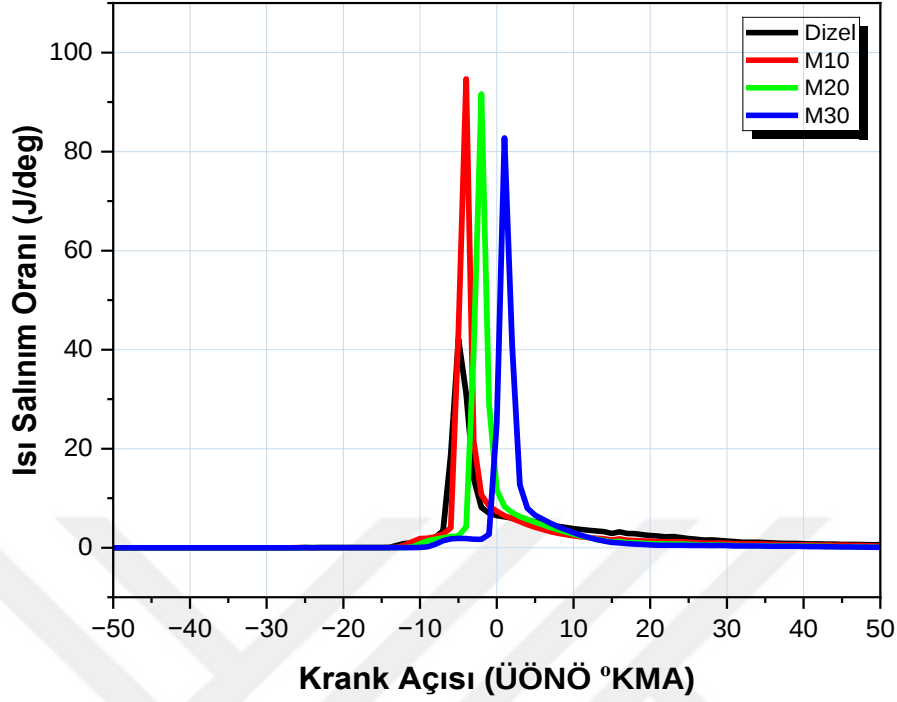
4.3. Farklı Metanol Oranlarındaki (M10, M20, M30) Yanma Karakteristikleri

Şekil 4.8’de dizel yakıtı ve farklı metanol oranına sahip yakıtların ısı salınım oranları karşılaştırılmıştır. Grafiğe göre en düşük ısı salınım oranı dizel yakıtta elde edilmiştir. Dizel yakıtı göre ısı salınım oranı M10 yakıtında %124.83, M20 yakıtında %117.52 ve M30 yakıtında ise %96.53 oranında daha fazla çıkmıştır. Metanol içeren yakıtlar arasında ise metanol oranı arttırıldıkça ısı salınım oranı düşmektedir. Örneğin; M10 yakıtının en yüksek ısı salınım oranı 94,69 J/deg iken, M20 ve M30 yakıtlarında

ise sırasıyla 91,61 J/deg ve 82,78 J/deg'dir. Saf dizel yakıtta ise bu değer 42,12 J/deg olarak ölçülmüştür.

Metanol yakıtının ısısal değeri (20,1 MJ/kg) dizel yakıtına (43 MJ/kg) göre çok daha düşük olmasına rağmen ısısal verim oranı dizel yakıttan daha yüksek çıkmıştır. Bunun sebebi setan sayısı olduğu düşünülmektedir. Metanol yakıtının setan sayısı çok düşük olduğundan silindir içerisine püskürtülen yakıt birikir hemen yanma gerçekleşmez. TG artacağından, silindir içerisinde biriken yüksek miktardaki yakıtın ani bir şekilde yanması sonucu basınç ve sıcaklık daha yüksek olmaktadır. Dolayısıyla maksimum ısısal verim oranında artış olması beklenir. Karışımda artan metanol oranına bağlı olarak ısısal verim oranında düşüş olmasının sebebi ise metanol yakıtının yüksek gizli buharlaşma ısısına bağlanabilir. Yakıt buharlaşırken ortamdan ısı çektiğinden dolayı ısısal verim oranında düşüş olmaktadır. Sonuç olarak karışım yakıtı içerisinde metanol oranının artışına bağlı olarak ısısal verim oranı gittikçe düşmektedir.

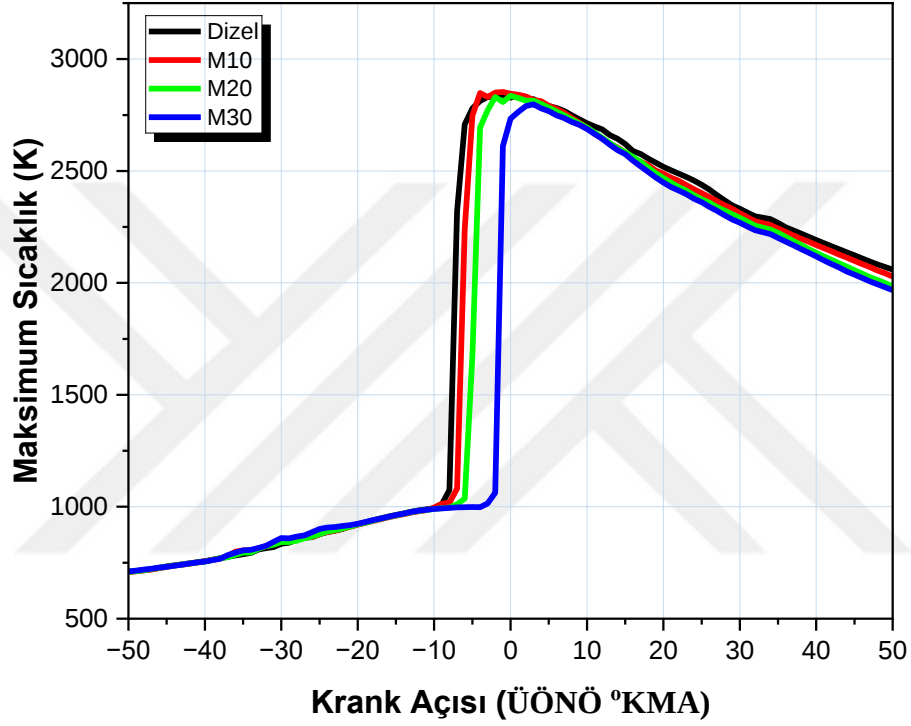
Şekil 4.8'e göre farklı oranlarda metanol içeren yakıt karışımları saf dizel yakıtına göre ısısal verim oranları daha yüksek çıkmıştır. Literatürde yapılan çalışmalar incelendiğinde Yanbuloğlu (2020), dizel yakıt, piroliz yağı ve bütanol yakıt karışımının motor performans ve emisyonlarına etkisini incelediği çalışmada test yakıtına bütanol ilavesiyle yakıt harmanındaki oksijen içeriğinin artışı genellikle ısısal verimini arttırdığını ifade etmiştir. Dolayısıyla metanol yakıtı içeriğindeki yüksek miktarda oksijen karışım yakıtlarının da oksijen içeriğini arttırmaktadır. Sonuç olarak metanol içeren yakıt karışımlarının içeriğindeki oksijenden dolayı saf dizel yakıtına göre ısısal verim oranları daha yüksek çıktığı söylenebilir.



Şekil 4.8. DY ve M10, M20, M30 yakıtlarının ısı salınım oranları

Şekil 4.9’da dizel yakıtı ve farklı metanol oranına sahip yakıtların maksimum sıcaklık değerleri karşılaştırılmıştır. Dizel yakıtının maksimum sıcaklık değerine yakın olmakla beraber M10 yakıtında en yüksek maksimum sıcaklık değeri elde edilmiştir. Yakıtta metanol oranının artırılmasıyla maksimum sıcaklık değeri düşmektedir. M10 yakıtının maksimum sıcaklık değeri 2853,37 K iken, M20 ve M30 yakıtlarında ise 2836,23 K ve 2798,08 K’dır. Saf dizel yakıtta ise bu değer 2841,91 K olarak ölçülmüştür. Yakıttaki metanol oranının artmasıyla maksimum sıcaklık değerinin düşmesi, metanol yakıtının gizli buharlaşma ısıyla ilişkilendirilebilir. Metanolün gizli buharlaşma ısısı çok yüksek olduğundan, buharlaşırken ortamdan ısı çekerek silindir içerisindeki maksimum sıcaklığı düşürücü yönde etki eder. Maksimum sıcaklığı etkileyen bir başka parametre de setan sayısıdır. Metanol yakıtının setan sayısı düşük olduğundan tutuşma gecikmesi artar ve yanma sonu maksimum sıcaklığı ve basıncının artması gerekmektedir. Ayrıca metanolün ısıl değeri düşük olduğu için karışımda metanol oranı arttıkça karışım yakıtının ısıl değeri düşer. Bunun sonucunda maksimum sıcaklık ve basınçta düşüş olması beklenmektedir. Dolayısıyla Tablo 3.3’te gösterilen deneyde kullanılan yakıtların özelliklerine göre sonuçlar elde edilmektedir.

Literatürde yapılan çalışmalar incelendiğinde saf dizel yakıtı göre karışım yakıtların egzoz gaz sıcaklıklarının düşük olması, karışım yakıtlarının yüksek gizli buharlaşma ısıları nedeniyle, yanma başlangıcındaki ve yanma süresi boyunca silindir sıcaklıklarının düşük olmasından kaynaklandığı ifade edilmiştir (Nour ve ark., 2019; Sharon ve ark., 2013; Başaran, 2022).

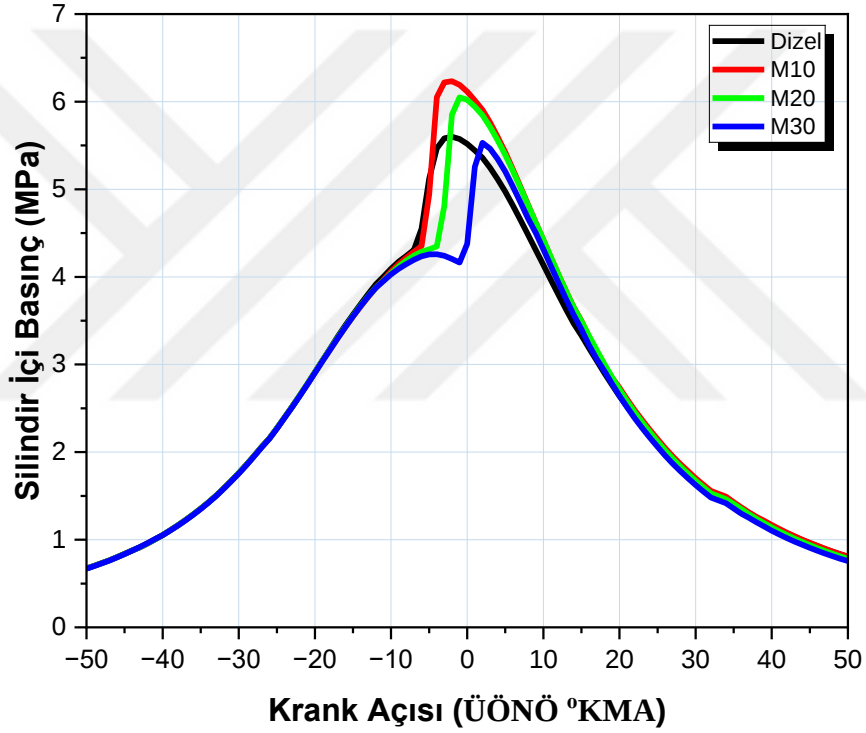


Şekil 4.9. DY ve M10, M20, M30 yakıtlarının maksimum sıcaklık değerleri

Şekil 4.10’da üç farklı metanol oranına sahip yakıtın silindir içi basınç değerleri görülmektedir. Grafiğe göre silindir içi basınç değeri en yüksek M10 yakıtından ve 6,23 MPa olarak elde edilmiştir. Dizel yakıtı göre M10 yakıtının silindir içi basınç değeri %11.44, M20 yakıtının silindir içi basınç değeri %8.05 oranında daha yüksek çıkmıştır. Ancak M30 yakıtının silindir içi basınç değeri dizel yakıttan %1.08 oranında daha düşük çıkmıştır. Ayrıca metanol oranının arttırılmasıyla silindir içi basıncın düştüğü tespit edilmiştir. M20 ve M30 yakıtlarında ise silindir içi basınç değeri sırasıyla 6,04 MPa ve 5,53 MPa olarak ölçülmüştür. Dizel yakıtta ise en yüksek silindir içi basınç değeri 5,59 MPa’dır. Karışım yakıtındaki metanol oranının artmasına bağlı olarak

silindir içi basınç değerinin düşmesinin sebebi, metanolün ısıl değerinin düşük olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

Benzer şekilde Çaylar (2018), içten yanmalı motorlarda yakıtta etanol katkısının motor emisyon ve performansına etkisini incelediği çalışmada, yakıttaki etanol oranının artmasına bağlı olarak silindir içerisindeki maksimum basıncın düştüğünü tespit etmiştir. Silindir içerisinde basıncın düşmesinin sebebi, karışımın içerisine eklenen etanol oranı arttıkça karışımın kalorifik değeri bu orana bağlı olarak düşeceğinden maksimum basınçta azalma olduğu ifade edilmiştir.



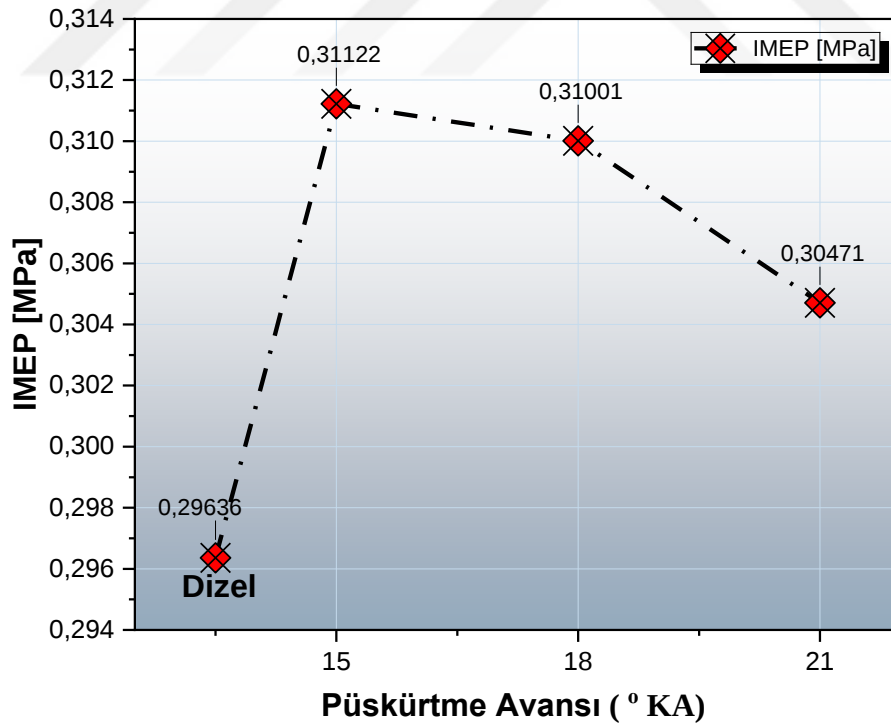
Şekil 4.10. DY ve M10, M20, M30 yakıtlarının silindir içi basınç değerleri

4.4. M10 Yakıtının Farklı Püskürtme Avanslarındaki Motor Performansı

Püskürtme avansı büyüdükçe püskürtmenin başlangıç anında ortam basıncı ve sıcaklığı düşük olacağından tutuşma gecikmesi süresi gittikçe artar. Bu durumda basınç yükselme hızı yüksek olmasına rağmen maksimum ve ortalama efektif basınçlar düşük olur, verim düşer ve motorun sert çalışmasına neden olur. Tutuşmanın daha da gecikmesi durumunda ise piston üst ölü noktadan iyice uzaklaşmış olacağından yanma

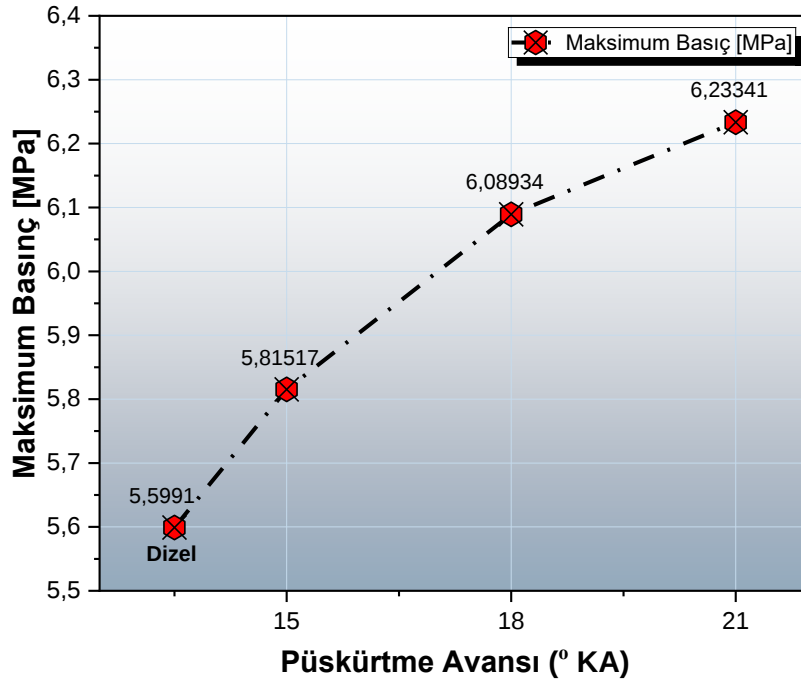
son derece kötü ve verim de çok düşük olur. Avans küçülünce tutuşma da geç olacağından piston üst ölü noktadan uzaklaşmış olur. Tutuşma gecikmesi süresi azalır. Bu durumda motor daha yumuşak çalışır. Fakat yanmanın büyük bir bölümü genişleme fazında gerçekleşir, dolayısıyla güçte azalma meydana gelir (Borat, 1992; Deniz, 2008; Yeşilyurt, 2017).

Şekil 4.11’de M10 yakıtında püskürtme avans değerine bağlı olarak efektif basınç değerindeki değişimler görülmektedir. Veriler incelendiğinde, dizel yakıtla oranla farklı püskürtme avanslarında efektif basınç değeri daha yüksektir. En yüksek efektif basınç değeri 15 °KA püskürtme avansında elde edilmiştir. Örneğin; püskürtme avansı 15° KA olduğunda, efektif basınç değeri 0.31122 MPa olarak ölçülürken, 18° KA ve 21° KA püskürtme avanslarında sırasıyla 0.31001 MPa ve 0.30471 MPa olarak ölçülmüştür. Püskürtme avansı değeri arttırıldıkça efektif basınç değeri düşmektedir. Literatürde yapılan çalışmalar incelendiğinde avans değerine bağlı olarak efektif basınç değerinin yapılan sayısal analizlerle benzer sonuçlar elde edildiği görülmüştür.



Şekil 4.11. DY ve M10 yakıtının ÜÖNÖ 15° KA, 18° KA, 21° KA püskürtme avanslarında efektif basınç değerindeki değişimler

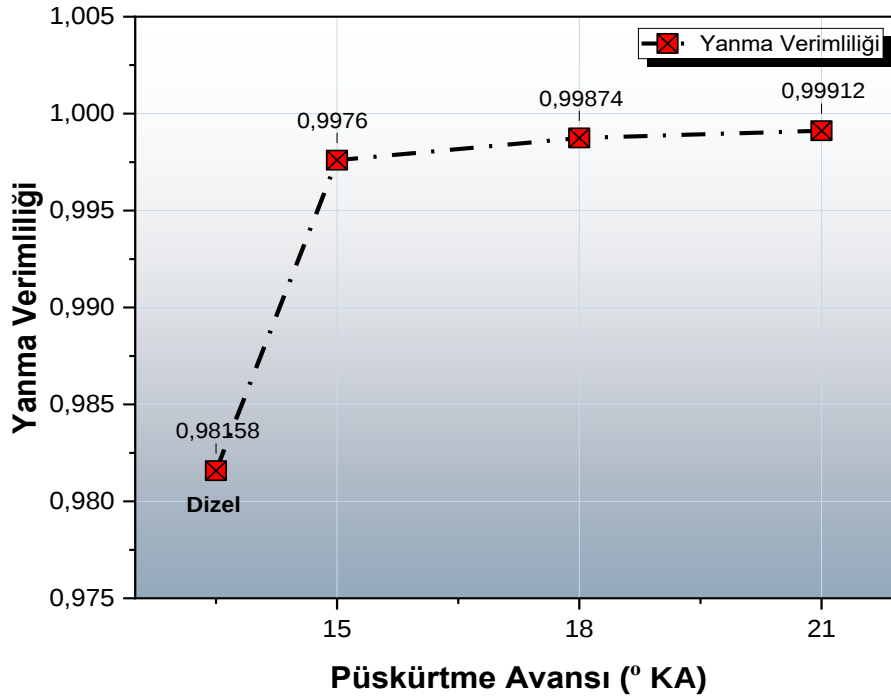
Şekil 4.12’de ÜÖNÖ 15° KA, 18° KA, 21° KA püskürtme avans değerlerinde maksimum basınç değerleri görülmektedir. Şekilde açıkça görüldüğü gibi farklı püskürtme avans değerlerinde M10 yakıtı dizel yakıtına oranla maksimum basınç değeri daha yüksektir. Grafiğe göre avans değeri arttıkça maksimum basınç değeri artmaktadır. Örnek olarak; 15° KA avans değerinde maksimum basınç 5.81517 MPa iken, 18 °KA ve 21 °KA püskürtme avans değerlerinde maksimum basınç sırasıyla 6.08934 MPa ve 6.23341 MPa’dır. Setan sayısı, yakıtın püskürtüldükten sonra silindir içerisindeki ısınan havanın içerisinde kendi kendine tutuşmasını belirleyen sayıdır. Metanol yakıtı setan sayısı çok düşük (3) olduğundan silindir içerisinde geç tutuşur, avans değeri artırıldıkça TG uzar buna bağlı olarak silindir içerisindeki basınç ve sıcaklık artar. Artan basınç ve sıcaklıkta silindir içerisine biriken yakıtın ani yanmasıyla yüksek oranda basınç oluşur. Literatürde yapılan çalışmalarda da benzer sonuçlar görülmüştür. Genel olarak püskürtme avansının artırılması tutuşma gecikmesini arttırmaktadır. Tutuşma gecikmesinin artması ise, bu süre içerisinde yanma odasına püskürtülen, buharlaşan ve havayla karışarak yanmaya hazır hale gelen karışımı arttırmaktadır. Bu durum maksimum basınç ve sıcaklıkları arttırmaktadır (Uludağ, 2010; Ayyılmaz, 2012).



Şekil 4.12. DY ve M10 yakıtının ÜÖNÖ 15° KA, 18° KA, 21° KA püskürtme avanslarındaki maksimum basınç değerleri

Şekil 4.13'e göre yanma verimliliğinin püskürtme avansı değerlerine göre değişimi görülmektedir. Püskürtme avansı düştükçe yanma verimliliği de düşmektedir. Örneğin; Şekil 4.1'de püskürtme avansı 21° KA iken yanma verimliliği 0.99912, 18 °KA ve 15 °KA püskürtme avans değerlerinde yanma verimliliği ise sırasıyla 0.99874 ve 0.9976'dır. Avans değeri arttırıldığında TG uzamaktadır. Tutuşma gecikmesinin uzamasıyla silindir içerisinde basınç ve sıcaklık artmaktadır. Ayrıca yakıt yanmak için yeterli süre bulabilmektedir. Bunun sonucunda daha verimli bir yanma gerçekleşmektedir.

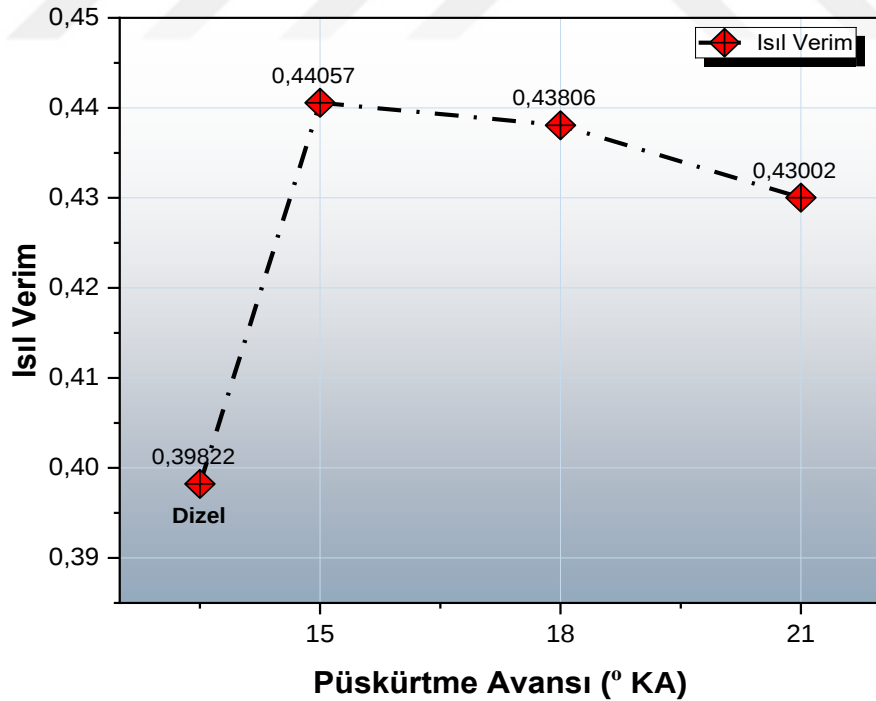
M10 yakıtı üç farklı püskürtme avansında dizel yakıtına oranla yanma verimliliği daha yüksek çıkmıştır. Bunun sebebi M10 yakıtının içeriğindeki metanolün yüksek oranda (%49,94) oksijen içeriğine sahip olması ve viskozitesinin düşük olmasından (0,58 mPas, 40°C) dolayı karışım yakıtının da viskozitesini düşürüp, püskürtülen yakıtın daha iyi atomizasyonu sağlanmakta ve silindir içerisinde sıkıştırılmış havaya daha iyi nüfus etmektedir. Bunun sonucunda da daha kaliteli bir yanma gerçekleştiği düşünülmektedir.



Şekil 4.13. DY ve M10 yakıtının ÜÖNÖ 15° KA, 18° KA, 21° KA püskürtme avanslarındaki yanma verimliliği değerleri

Dizel motorlarında püskürtme Ü.Ö.N.'ya varmadan başlatılır. Buna püskürtme avansı (PA) denir ve krank mili açısı (KMA) olarak ifade edilir (Borat ve ark.,1992). Şekil 4.14'te üç farklı püskürtme avans değerinde ısı verim değerleri görülmektedir. M10 yakıtı üç farklı püskürtme avansında dizel yakıtına oranla ısı verimi daha yüksek çıkmıştır. En yüksek ısı verim 15° KA püskürtme avans değerinde elde edilmekle birlikte püskürtme avansının artırılmasıyla ısı verimde düşüş olduğu gözlenmiştir. Örneğin; 15° KA avansında ısı verim değeri 0,44057 iken, 18° KA ve 21° KA püskürtme avansında ısı verim değerleri sırasıyla 0.43806 ve 0.43002'dir.

Uslu (2006), dizel motorlarında farklı püskürtme avanslarının dizel-etanol kullanımında performans ve emisyonlara etkisini incelediği çalışmasında, avansın artırılmasıyla yakıtın püskürtme başlangıcı KMA olarak daha erkene alınmakta, buna bağlı olarak yanma odasında da yeterli basınç ve sıcaklık oluşmadığı için de hem tutuşma gecikmesi uzamakta hem de motor vuruntusu artmaktadır. Böylece içeri alınan yakıtın yanma kalitesinin azaldığını ve ısı verimin düştüğünü belirtmiştir.



Şekil 4.14. DY ve M10 yakıtının ÜÖNÖ 15° KA, 18° KA, 21° KA püskürtme avanslarındaki ısı verim değerleri

4.5. M10 Yakıtının Farklı Püskürtme Avanslarındaki Egzoz Emisyonları

Silindir içerisine püskürtülen yakıtın genel olarak oksijenin ve ya sıcaklıkların yetersiz olmasından dolayı tam yanmaması sonucu HC emisyonları oluşmaktadır.

Şekil 4.15'te üç farklı püskürtme avansında krank açısına bağlı olarak HC (hidrokarbon) emisyonlarındaki değişim görülmektedir. Püskürtme avansının artırılması HC emisyon değerlerinde artışa neden olmuştur. En yüksek yanmamış hidrokarbon değeri 21° KA avans değerinde elde edilmiştir. Örneğin; 21° KA avans değerinde en yüksek yanmamış HC değeri 678,03 g/kgfuel olarak ölçülürken, 18° ve 15° püskürtme avansında ise bu değer sırasıyla 659,005 g/kgfuel ve 611,26 g/kgfuel olarak ölçülmüştür.

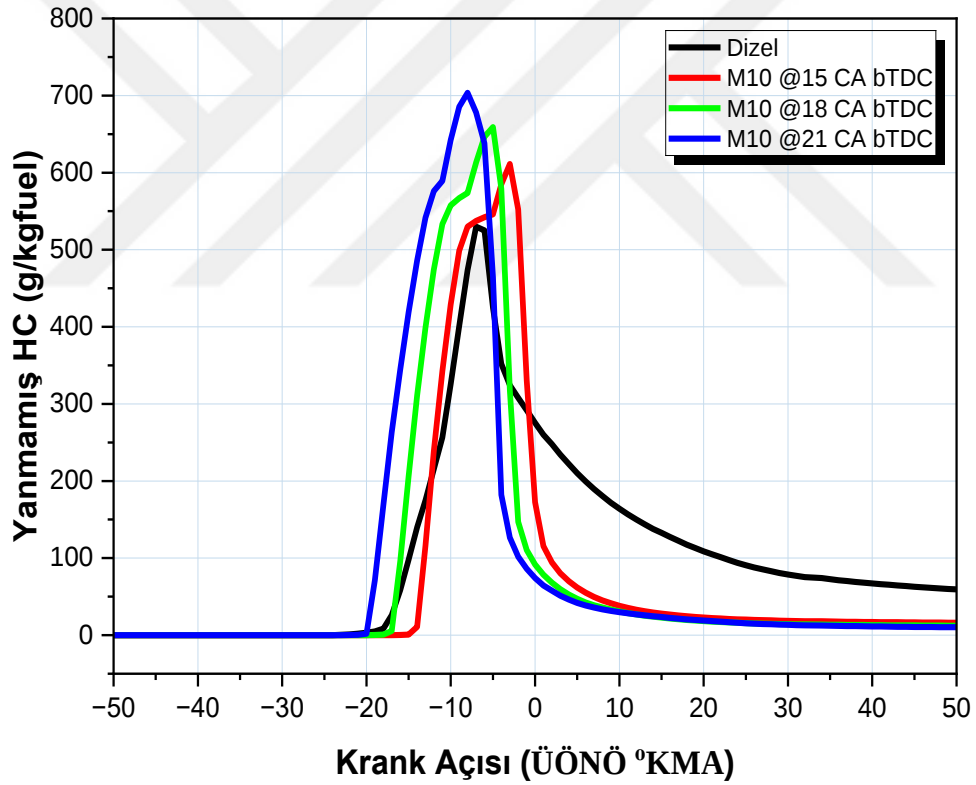
İlhan (2007), dizel motorlarında dizel-metanol kullanımında püskürtme avansının performans ve emisyonlara etkisini incelediği çalışmasında, avansın artmasıyla TG uzamakta ve yakıt yanmak için yeterli süre bulabilmektedir. Böylece yanma sonu basıncı ve sıcaklıkları artmaktadır. Buna bağlı olarak HC emisyonlarının düştüğünü ifade etmiştir. Literatürde yapılan çalışmalar incelendiğinde avans değerine bağlı olarak yanmamış hidrokarbon emisyonunun yapılan sayısal analizlerle örtüşmediği görülmüştür.

Hidrokarbon emisyonları yakıtın setan sayısı, viskozite, buharlaşma ısısı ve içerdiği oksijen miktarına bağlıdır. Ayrıca dizel motorun çalışma koşulları ve yanma kalitesi de yanmamış hidrokarbonları etkileyen faktörler arasındadır.

M10 yakıtı üç farklı püskürtme avansında yanmamış HC emisyonu saf dizel yakıtından daha yüksek çıkmıştır. Bunun sebebi metanol yakıtının setan sayısının çok düşük olmasıdır. Dizel motorlarında ideal bir yanmanın ve ideal bir tutuşma gecikmesinin sağlanması için setan sayısı 46 ile 50 arasında olmalıdır (Özer, 2010). Setan sayısı çok düşük olduğundan yanma kötüleşmektedir. Bir başka sebep ise metanol yakıtının viskozitesinin çok düşük olmasıdır. Ayrıca metanolün buharlaşma ısısı (1167,7 kJ/kg) dizel yakıtına (620 kJ/kg) oranla çok yüksek olduğundan metanol ilavesiyle karışım yakıtın buharlaşma ısını artırır. Bunun sonucunda buharlaşma süresi daha fazla uzar. Süredeki bu uzama aynı şekilde daha uzun tutuşma gecikmesine ve yanmanın daha kısa sürede olmasına sebep olur. Bunun sonucunda eksik yanma ürünü olan HC emisyonu oluşur.

HC emisyonları, silindir içerisindeki bazı bölgelerde, H/Y karışım oranının çok fakir ya da çok zengin olması sonucu eksik yanmanın oluşmasıyla da meydana

gelmektedir (Goga vd., 2019; Singh vd., 2020; Xiao vd., 2020; Yılmaz vd., 2014; Ateş, 2021). Dizel motorlarında fakir karışımda hava oranının çok artması ile yakıtın silindir içerisindeki kısmi bölgelerde sönmesi de HC emisyonlarının artışına sebep olarak gösterilebilir. Çünkü karışım yakıtı içerisindeki metanol yakıtının stokyometrik hava/yakıt oranı (7,14) düşüktür. Bu oran bize 1 hacim metanolün yakılması için 7,14 havaya ihtiyaç olduğu anlamına gelir. Dizel yakıtı (14,7) oranla çok düşüktür. Saf dizel yakıtına metanol karıştırıldığında karışımın yanabilmesi için daha az oksijene ihtiyaç vardır. Ayrıca metanol yakıtının içeriğinde de çok yüksek miktarda oksijen mevcut olduğundan dolayı fakir karışım oluşturup yakıtın silindir içerisindeki kısmi bölgelerde sönmesine neden olur. Bu da HC emisyonlarını arttırır.



Şekil 4.15. DY ve M10 yakıtının ÜÖNÖ 15° KA, 18° KA, 21° KA püskürtme avanslarında yanmamış HC emisyonlarındaki değişim

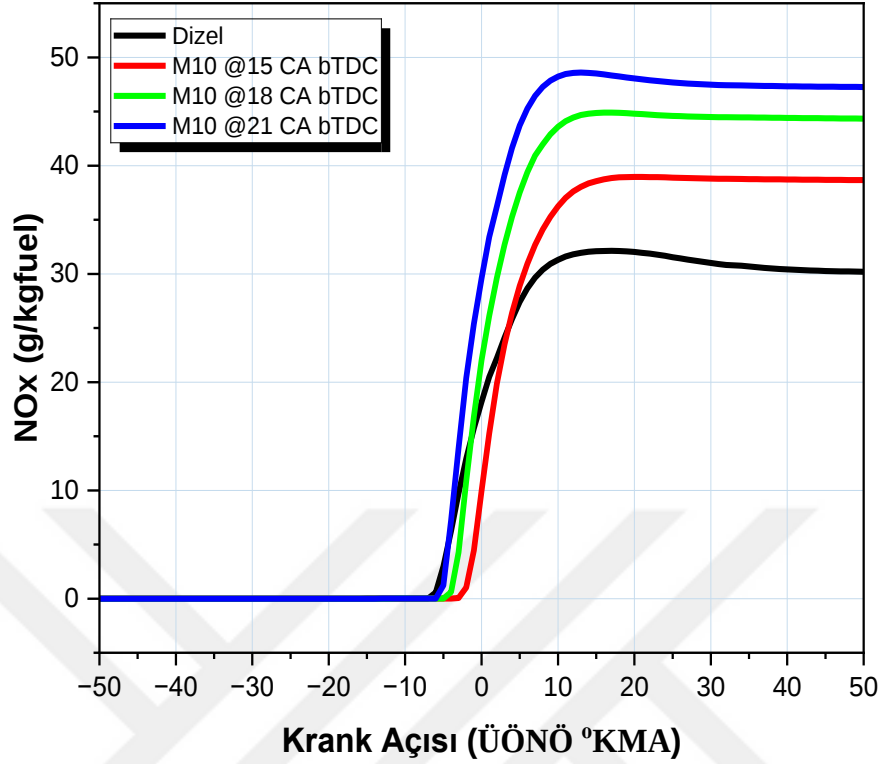
Dizel motorlarındaki azot oksit (NO_x) oluşumunun ana nedeni yanma sonucu sıcaklıklarının artmasıdır. Yanma sürecinde oluşan yüksek sıcaklıklarda (1600°C 'nin üstünde), havanın içerisindeki azotun oksijenle reaksiyona girmesi sonucu azot oksitler

meydana gelmektedir. Azot oksit oluşumunu silindir içi sıcaklıklarının büyük ölçüde etkilediği, sıcaklık arttıkça azot oksitin hızla arttığı anlaşılmaktadır (Sayın ve ark., 2007).

Şekil 4.16'da üç farklı püskürtme avans değerinde NO_x emisyonunun krank açısıyla değişimi görülmektedir. En yüksek NO_x emisyon değeri 21° KA avans değerinde elde edilirken, en düşük NO_x emisyon değeri ise 15° KA püskürtme avans değerinde elde edilmiştir. Örneğin; 21° KA avans değerinde elde edilen maksimum NO_x değeri 48,598 g/kgfuel olarak ölçülürken, 15° püskürtme avansında ise 38,958 g/kgfuel olarak ölçülmüştür. Püskürtme avansı değeri arttıkça NO_x emisyon değeri artmaktadır. İnert bir gaz olan azot, belirli koşullar oluşturulduktan sonra tepkimeye girmektedir. Azot atomları arasındaki üçlü bağı kırmak için yüksek enerjiye ihtiyaç vardır. Sonuç olarak püskürtme avansı değeri arttırıldıkça TG artar ve yanma sonu basınç ve sıcaklıklar artar buna bağlı olarak azot atomları arasındaki güçlü bağlar kırılır. Metanol yakıtı içeriğinde yüksek miktarda oksijen bulundurmaktadır. Bağları koparılan azot atomları oksijen atomlarıyla tepkimeye girerek NO_x emisyonlarını oluşturmaktadır.

M10 yakıtı üç farklı püskürtme avansında NO_x emisyonu saf dizel yakıtından daha yüksek çıkmıştır. Bunun sebebi karışım yakıtı içerisindeki metanolün yüksek miktarda oksijen içermesinden dolayı yakıtça zengin bölgelerde gerekli oksijeni sağlamasından dolayı daha iyi bir yanma ve yüksek ortam sıcaklığı oluşturur. Bilindiği gibi silindir içerisindeki sıcaklık ve NO_x emisyon miktarı doğru orantılıdır. Dizel yakıtına oranla metanol-dizel yakıtı karışımının daha yüksek NO_x emisyonu oluşmasının başka bir sebebi ise; karışım yakıtında kullanılan metanolün setan sayısının düşük olması ve karışım yakıtının da setan sayısını düşürmesidir. Buna bağlı olarak tutuşma gecikmesi artış göstererek, silindir içerisinde ani basınç ve sıcaklık artışına neden olur. Artan sıcaklık ve basıncın etkisiyle azot atomları arasındaki bağlar kırılıp oksijen atomlarıyla birleşirler. Bunun sonucunda NO_x emisyonlarında artış beklenir.

Ayyılmaz (2012), bütanol-dizel yakıt karışımı ile çalışan bir motorda püskürtme zamanının performans ve emisyonlara etkisini incelediği çalışmasında, karışımın püskürtme avansının arttırılmasıyla NO_x emisyonlarında artış olduğunu tespit etmiştir. Püskürtme avansının arttırılması püskürtme başlangıcının bir miktar öne alınmasıyla tutuşma gecikmesinin arttığı ve buna paralel olarak NO_x emisyonlarının arttığı ifade edilmiştir.



Şekil 4.16. DY ve M10 yakıtının ÜÖNÖ 15° KA, 18° KA, 21° KA püskürtme avanslarındaki NO_x emisyonları

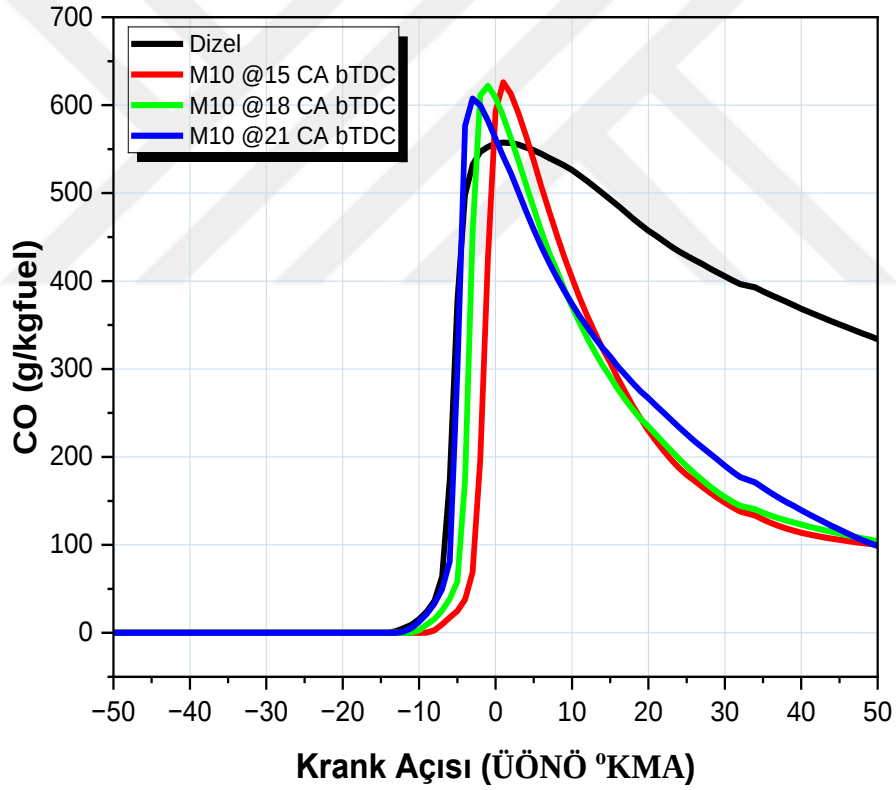
Dizel motorlarında karbonmonoksit (CO) oluşumu oksijenin yetersiz olduğu veya silindirin içindeki bazı bölgelerde karışımın homojen olamayışından kaynaklanmaktadır. Oksijenin yetersiz olması durumunda tam yanma gerçekleşemediğinden yakıtın içindeki karbon tam yanma ürünü olan karbondioksit (CO₂) dönüşemez ve karbonmonoksit (CO) olarak kalır (Ergeneman ve ark., 1998).

Şekil 4.17’de M10 yakıtının karbonmonoksit (CO) emisyon değerleri üç farklı püskürtme avansında krank açısına bağlı olarak değişimi görülmektedir. Grafikte de görüldüğü gibi en yüksek CO değeri 15° KA avansı değerinde (625,923g/kgfuel) elde edilirken, en düşük CO emisyon değeri ise 21 °KA püskürtme avansı değerinde (607,382 g/kgfuel) elde edilmiştir. Püskürtme avansı değeri arttıkça CO emisyon değeri azalmaktadır.

Chan ve ark. (1997), püskürtme avans değerinin azaltılmasıyla karbon ve oksijen atomları arasında reaksiyon süresinin kısaldığını, buna bağlı olarak CO emisyonlarında artış olduğunu belirtmiştir. CO emisyonunun düşük çıkmasının bir

başka sebebi kimyasal formülü CH_3OH olan metanolün düşük karbonlu bir yakıt olmasından dolayı dizel motorda az miktarda CO emisyonu oluştuğu söylenebilir.

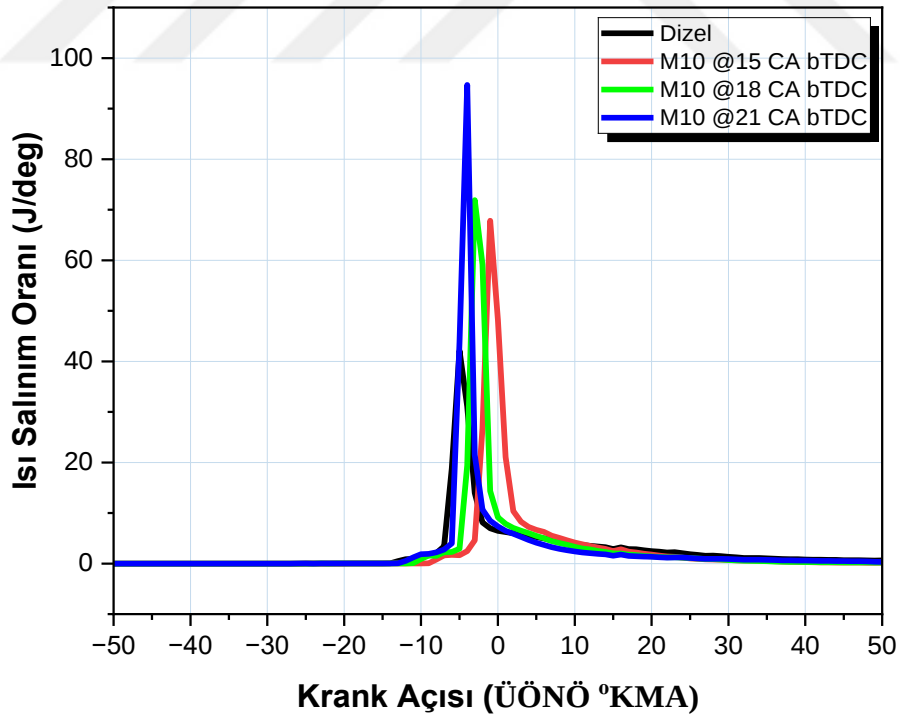
M10 yakıtı üç farklı püskürtme avansında CO emisyonu saf dizel yakıtından daha yüksek çıkmıştır. Bunun sebebi metanol yakıt yoğunluğunun (794 kg/m^3) dizel yakıttan (830 kg/m^3) daha düşük olması ve faz ayrışmasına neden olduğundan dolayı da yakıt-hava karışımının homojen bir şekilde karışamamaktadır. Bunun sonucunda ise O_2 'nin silindir içerisinde bazı kısımlarda eksik olabileceğinden, CO emisyonunda artış olduğu düşünülmüştür. Ayrıca, metanol yakıtının yüksek uçuculuğu nedeniyle, silindir içinde soğutma etkisi olabilmekte ve bu da CO emisyonlarında artışa sebep olabileceği düşünülmüştür.



Şekil 4.17. DY ve M10 yakıtının ÜÖNÖ 15° KA, 18° KA, 21° KA püskürtme avanslarındaki CO emisyon değerleri

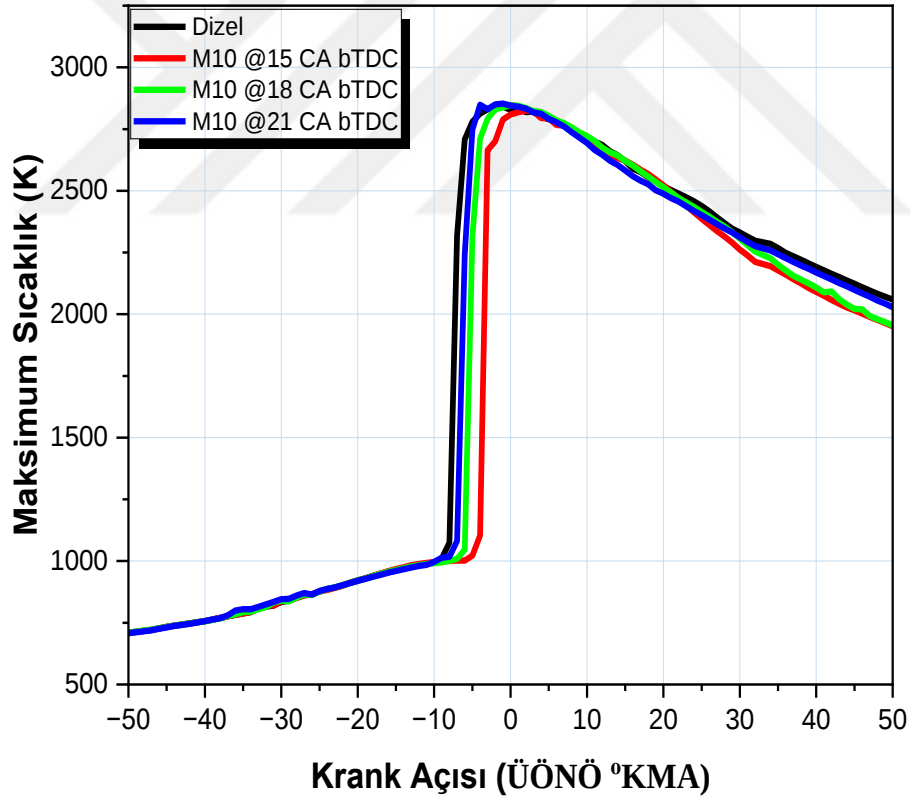
4.6. M10 Yakıtının Farklı Püskürtme Avanslarındaki Yanma Karakteristikleri

Şekil 4.18’de üç farklı püskürtme avansında krank açısına göre ısı salınım oranının değişimi görülmektedir. Püskürtme avansının artırılmasıyla ısı salınım oranı artmaktadır. Grafikte görüldüğü gibi en yüksek ısı salınım oranı 21° KA avansında ve 94,697 J/deg olarak ölçülmüştür. Ayrıca 18 °KA ve 15 °KA püskürtme avanslarında bu değer sırasıyla 71,896 J/deg ve 67,814 J/deg olarak ölçülmüştür. Metanol yakıtının ısı değeri (20,1 MJ/kg) dizel yakıtına (43 MJ/kg) göre çok daha düşük olmasına rağmen hacimsel olarak %10 metanol içeren M10 yakıtının ısı salınım oranı farklı püskürtme avanslarında dizel yakıttan daha yüksek çıkmıştır. Bunun sebebi setan sayısı olduğu düşünülmektedir. Metanol yakıtının setan sayısı çok düşük olduğundan silindir içerisine püskürtülen yakıt birikir hemen yanma gerçekleşmez. Püskürtme avansının artırılmasıyla TG artacağından, silindir içerisinde basınç ve sıcaklık artmaktadır. Silindir içerisine biriken yakıtın da ani olarak yanmasıyla ısı salınım oranı artmaktadır.



Şekil 4.18. DY ve M10 yakıtının ÜÖNÖ 15° KA, 18° KA, 21° KA püskürtme avanslarındaki ısı salınım oranları

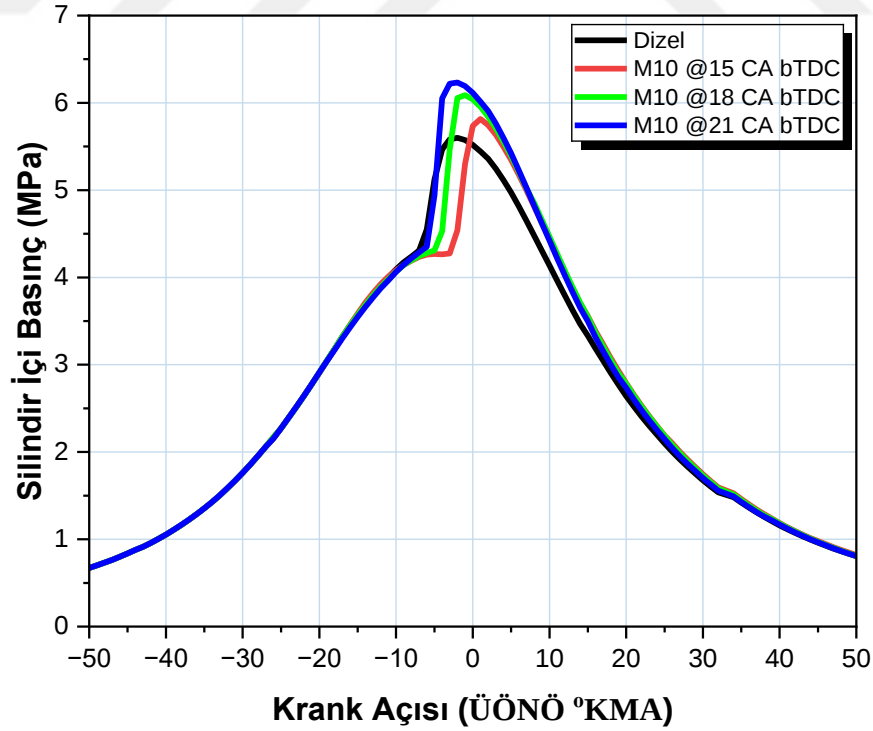
M10 yakıtının ÜÖNÖ 15°, 18° ve 21° KA püskürtme avanslarında krank açısına bağlı olarak maksimum sıcaklık değerleri Şekil 4.19’da görülmektedir. Grafiğe göre M10 yakıtında maksimum sıcaklık ÜÖNÖ 21° KA avansında elde edilmiştir. Ayrıca püskürtme avansının her 3° arttırılmasıyla sıcaklık daha da artmaktadır. Fakat grafiğe göre maksimum sıcaklık değerlerinin farklı avans değerlerinde dizel yakıtla birbirlerine yakın değerde oldukları görülmüştür. Daha önce de ifade edildiği gibi püskürtme avansının arttırılmasıyla TG artar buna bağlı olarak basınç ve sıcaklık artar. Hacimsel olarak %10 metanol katkılı yakıtın saf dizel yakıtı göre setan sayısının da düşük olmasından dolayı yakıt silindir içerisine birikir ve ani bir şekilde yanar. Bu ani yanma sonucunda maksimum sıcaklık elde edilir. Literatürde yapılan çalışmalarda benzer sonuçlar görülmüştür (Uludağ, 2010; Ayyılmaz, 2012).



Şekil 4.19. DY ve M10 yakıtının ÜÖNÖ 15° KA, 18° KA, 21° KA püskürtme avanslarında maksimum sıcaklık değerlerindeki değişimler

Şekil 4.20’da M10 yakıtının üç farklı püskürtme avanslarındaki krank açısına bağlı olarak silindir içi basınç değerleri görülmektedir. Grafikteki eğrilere göre püskürtme avansı arttıkça silindir içi basınç değeri artmaktadır. En yüksek silindir içi basınç değeri ÜÖNÖ 21° KA püskürtme avansında 6,233 MPa olarak ölçülmüştür. Ayrıca ÜÖNÖ 15 °KA ve 18 °KA püskürtme avans değerlerinden elde edilen en yüksek silindir içi basınç değerleri sırasıyla 5,815 MPa ve 6,089 MPa olarak ölçülmüştür. Avansın artmasıyla silindir içi basınç değerinin artmasının sebebi, TG uzamakta ve yakıt yanmak için yeterli süre bulabilmektedir. TG süresinin uzaması silindir içerisinde yanma sonu basıncı ve sıcaklıklarını artmaktadır. Elde edilen sonuçlar diğer araştırmacılar tarafından yapılan çalışmalar ile büyük ölçüde benzerlik göstermektedir (Uslu, 2006; Ayyılmaz, 2012).

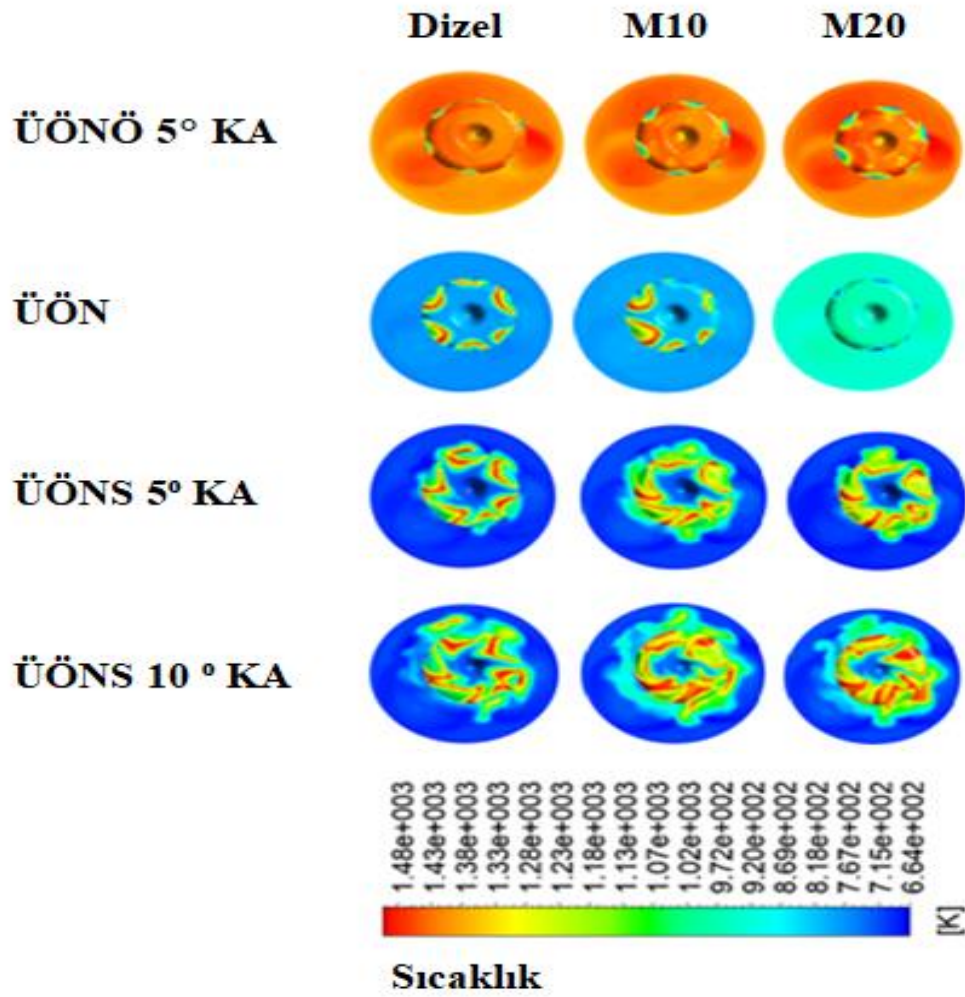
M10 yakıtı üç farklı püskürtme avansında silindir içi basınç değerleri saf dizel yakıtından daha yüksek çıkmıştır. Bunun sebeplerinden biri setan sayısı düşük olan metanol gibi yakıtlarda tutuşma gecikmesi uzar, ani yanma periyodundaki yanacak yakıtın artışına sebep olur ve bu durum silindir içi maksimum basıncı arttırmaktadır.



Şekil 4.20. DY ve M10 yakıtının ÜÖNÖ 15° KA, 18° KA, 21° KA püskürtme avanslarında silindir içi basınç değerlerindeki değişimler

4.7. Dizel Yakıt, M10 ve M20 Yakıtlarının Silindir İçi NO_x ve Sıcaklık Konturları

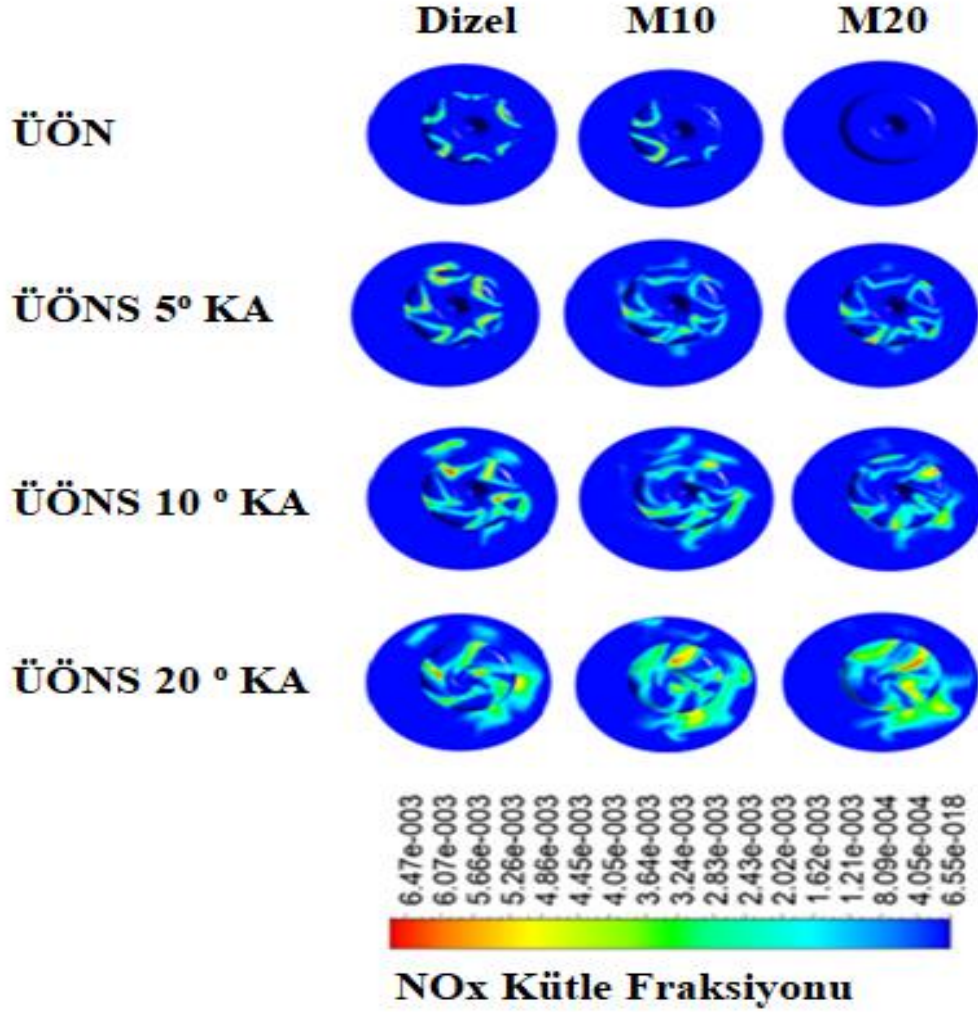
Şekil 4.21’de dizel yakıt, M10 ve M20 yakıtlarının silindir içi sıcaklıkları kontur olarak gösterilmiştir. Piston üst ölü noktadan aşağı doğru indikçe her üç yakıt için NO_x miktarının arttığı açıkça görülmektedir. Her üç yakıt için piston üst ölü noktadan önce 5° KA konumunda iken maksimum sıcaklıklar oluşmuştur. Ayrıca piston üst ölü noktadan uzaklaştıkça her üç yakıt için sıcaklığın arttığı açıkça görülmektedir.



Şekil 4.21. DY, M10 ve M20 yakıtlarının silindir içi sıcaklık konturları

Şekil 4.22’de dizel yakıt, M10 ve M20 yakıtlarının silindir içi NO_x kütle fraksiyonu kontur olarak gösterilmiştir. Piston üst ölü noktadan aşağı doğru indikçe her üç yakıt için NO_x miktarının arttığı açıkça görülmektedir. En yüksek NO_x emisyonu M20 yakıtında , piston üst ölü noktadan sonra (ÜÖNS) 20° KA konumunda oluşmuştur.

Ayrıca en düşük NO_x emisyonu yine M20 yakıtında, fakat pistonun konumu üst ölü noktadayken oluşmuştur. Genel olarak pistonun üst ölü noktaya yakın olduğu konumda, artan metanol oranına bağlı olarak NO_x emisyonlarında azalma olduğu görülmektedir. Ancak piston üst ölü noktadan uzaklaştıkça artan metanol oranına bağlı olarak NO_x kütle fraksiyonu değeri artmaktadır.



Şekil 4.22. DY, M10 ve M20 yakıtlarının silindir içi NO_x kütle fraksiyonu konturları

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

5.1. Sonuçlar

Tez çalışmasının ilk aşaması olan farklı metanol oranlarına (M10, M20 ve M30) sahip yakıtın motor performans, egzoz emisyonu ve yanma karakteristikleri üzerindeki etkileri sayısal olarak incelenmiştir. Veriler incelendiğinde metanolün düşük oranda kullanıldığı M10 yakıtı dizel yakıtı göre efektif basınçta %2.81, maksimum basınçta %11.4, yanma verimliliğinde %1.83, ısı veriminde ise %8.04 oranında artış olmuştur. Ancak yakıttaki metanol oranının artmasına bağlı olarak efektif basınç, yanma verimliliği, maksimum basınç ve ısı verim değerlerinde düşüşe neden olmuştur. Metanol oranının egzoz emisyonları üzerinde etkileri incelendiğinde, yakıttaki metanol oranının arttırılmasıyla yanmamış HC, NO_x ve CO emisyonlarında düşüş olmuştur. Yanma karakteristiklerinde ise; en yüksek ısı salınım oranı, maksimum sıcaklık ve silindir içi basınç değerleri M10 yakıtında görülmüştür. Dizel yakıtı göre M10 yakıtında ısı salınım oranı %124.83, maksimum sıcaklık %0.40 ve silindir içi basınç değerinde ise %11.25 oranında artış olmuştur. Karışım yakıtı içerisinde artan metanol oranına bağlı olarak bu değerlerin düştüğü görülmüştür.

Tez çalışmasının ikinci aşamasında ise, püskürme avansının motor performansı, egzoz emisyonları ve yanma karakteristiklerine etkileri incelenmiştir. Yapılan incelemeler sonucunda M10 yakıtı her üç püskürtme avans değerinde dizel yakıtı göre efektif basınç, maksimum basınç, yanma verimliliği ve ısı verim değerleri daha yüksek çıkmıştır. Ayrıca püskürtme avansı değerinin arttırılmasıyla maksimum basınç ve yanma verimliliğinin arttığı, ancak efektif basınç ve ısı verim gibi motor performans parametrelerinin düştüğü tespit edilmiştir. Püskürtme avansının emisyonlara etkisi incelendiğinde, M10 yakıtının üç farklı püskürtme avansı (ÜÖNÖ 15°, 18° ve 21° KA) değerinde emisyon değerleri saf dizel yakıtına göre daha yüksek çıkmıştır. Ayrıca M10 yakıtında en düşük yanmamış HC, NO_x emisyon değerleri ÜÖNÖ 15° KA püskürtme avansında oluşmuştur. ÜÖNÖ 15° KA püskürtme avansında yanmamış HC emisyonu dizel yakıtı göre %15.35, NO_x emisyonu ise %28.62 daha yüksek çıkmıştır. En düşük CO emisyon değeri ise ÜÖNÖ 21° KA püskürtme avansı değerinde oluşmuştur. 21° KA püskürtme avansı değerinde CO emisyonu dizel yakıtı göre %8.96 daha yüksek çıkmıştır. Yanma karakteristiklerinde ise; en yüksek ısı salınımı, maksimum sıcaklık ve silindir içi basınç değerleri ÜÖNÖ 21° KA püskürtme avans değerinde oluşmuştur.

ÜÖNÖ 21° KA püskürtme avans değerinde dizel yakıtı göre ısı salınımı %124.83, maksimum sıcaklık %0.40 ve silindir içi basınç değerinde ise %11.25 daha yüksek çıkmıştır. Ayrıca püskürtme avansı değerinin arttırılmasıyla ısı salınımı, maksimum sıcaklık ve silindir içi basınç değerlerinde artış olduğu görülmüştür.

Elde edilen sonuçlara göre, metanolün dizel yakıt katkısı olarak düşük oranda kullanıldığında bazı motor performans parametreleri ve yanma karakteristiklerini olumlu yönde etkilemektedir. Ancak düşük oranda dizel yakıtla karıştırıldığında emisyon değerlerinde artışa neden olmaktadır. Ayrıca püskürtme avansının arttırılmasıyla maksimum basınç, yanma verimliliği gibi performans parametrelerinde artış görülürken, efektif basınç ve ısı veriminde ise düşüş olmuştur. Püskürtme avansının emisyonlar üzerindeki etkisi düşük avans değerinde yanmamış HC ve NO_x emisyonlarında azalma kaydedilirken, CO emisyonunda artış olmuştur. Isı salınım oranı, maksimum sıcaklık ve silindir içi basınç değerlerinde avansın artmasına bağlı olarak artış olduğu görülmüştür.

5.2. Öneriler

1. Metanol, fosil kökenli yakıtlardan üretilebildiği gibi tarımsal atıklar gibi yenilenebilir enerji kaynaklarından da üretilebilen bir yakıttır. Bir tarım ülkesi olan Türkiye'nin tarımsal üretim polansiyeli yüksek olması metanol üretiminin yapılabileceğinin göstergesidir. Ayrıca biyokütle kaynaklarından metanol üretimi devlet desteğiyle yeteri kadar yatırım yapılırsa ülke ekonomisine katkısı olacağı düşünülmektedir.
2. Metanolün seten sayısı dizel yakıtına oranla çok düşük olduğundan dolayı vuruntu oluşturmakta ve motor performansını düşürmektedir. Bunun için de setan arttırıcı katkı maddeleri eklenerek performans, egzoz ve yanma karakteristikleri incelenebilir.
3. Petrol kökenli dizel içerisindeki metanol oranının artırılabilmesi amacı ile hacimsel olarak %40 ve daha yüksek oranlarda kullanımı araştırılabilir. Bu bağlamda yüksek oranda metanol-dizel yakıt karışımları farklı enjeksiyon ayarlarında, farklı sıkıştırma oranlarında ve farklı yanma odalı motorlarda da denenebilir.

KAYNAKLAR

- Adin, M., Ş., 2019, Bir Dizel Motorlu Jeneratörün İlk Hareket ve Isınma Sürecinde Oluşan Emisyonları Üzerinde Biyoetanol Kullanımının Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Batman Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Batman.
- Akgün, G., Bayındır, H., Aydın, H. ve Düz, Z., 2009, Hayvansal Yağlardan Biyodizel Üretimi ve Teknik Değerlerinin Belirlenmesi Üzerine Bir Çalışma, V. Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu, Diyarbakır, 131-136.
- Aktaş, F., Karaaslan, S., Kılıç, M., Yücel, N., 2019, Farklı Oranlarda Etanol ve Metanol Katkısının Tam Yük Altında Dört Silindirli Dizel Bir Motorun Performans ve Emisyon Değerlerine Olan Etkilerinin Sayısal Olarak İncelenmesi, *Politeknik Dergisi*, 2019; 22(4): 967-977
- Altun, A., 2009, Hayvansal yağlardan biyoyakıt üretimi ve bir dizel motorunda kullanılabilirliğinin deneysel araştırılması, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- Anonim, 2022, Türkiye Petrolleri Anonim Ortaklığı 2022 Petrol ve Doğalgaz Sektör Raporu, sayfa 11-13.
- Ateş, Z.C., 2021, Bütanol Katkılı Dizel Yakıtının Motor Performans ve Emisyonlarına Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- Atmanlı, A., 2013, Dizel motorunda dizel yakıtı-alkol-bitkisel yağ karışımları kullanımının motor karakteristiklerine etkisinin incelenmesi, Doktora Tezi, Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir.
- Ayyılmaz, N., 2012, Bütanol/Dizel Yakıt Karışımı İle Çalışan Bir Motorda Püskürtme Zamanının Performans ve Emisyonlara Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük.
- Başaran, H.Ç., 2022, Bütanol/oktanol ve atık motor yağı karışımlarının dizel motorda kullanımı, Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Bayık, M., 2010, Dizel Yakıtına İzobütanol İlavesinin Performans ve Emisyonlara Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük.
- Bayraktar, H., 2005, Experimental and Thereotical Investigation of Using Gasoline Ethanol Blends in Spark Ignition Engines, *Renewable Energy* 30: 1733-1747.

- Bayraktar H., 2007. An experimental study on the performance parameters of an experimental CI engine fueled with diesel–methanol–dodecanol blends, *Fuel*, 87, 158-164.
- Borat, O., Sürmen, A., Balcı, M., İçten yanmalı motorlar, Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Vakfı Yayınları, 1992.
- Borat, O., Balcı, M.A., 1994, İçten Yanmalı Motorlar Ders Kitabı, Cilt 1, *Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Vakfı Yayınları-2*, İstanbul.
- Bozkurt, A., 2021. Dizel/Biyodizel/Metanol Yakıt Karışımlarına Kül ve TiO_2 Nanopartikül Katkısının Dizel Motorunun Performans ve Emisyon Değerlerine Etkisinin DeneySEL Olarak İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri.
- Candan, F., 2012, Dizel metanol ve katkı maddelerinin dizel motor performansı ve emisyonu etkisinin araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
- Chan, M., Das, S., Reitz, R.D., “Modelling Multiple Injection and EGR Effects on Diesel Engine Emissions” , *SAE Paper No:972864*, (1997)
- Cheng, C.H., Cheung, C.S., Chang, T. L., Lee, Yao, C.D., Tsang, K.S., Comparison of emission of a direct injection diesel engine operating on biodiesel with emulsified and fumigated methanol, *Fuel* 87 (2008) 1870–1879.
- Çaylar, G., 2018. İçten Yanmalı Motorlarda Yakıtta Etanol Katkısının Motor Emisyon Ve Performansına Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Çelik, M., Örs, İ., Bayındırlı, C., Demiralp, M. (2017). Experimental investigation of impact of addition of bioethanol in different biodiesels, on performance, combustion and emission characteristics. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 31(11):5581-5592.
- Çetinkaya, S., 1999, Termodinamik , *Nobel Yayınevi*, Ankara.
- Datta, A., Mandal, B.K., (2016) Impact of alcohol addition to diesel on the performance combustion and emissions of a compression ignition engine. *Applied Thermal Engineering*, 98:670-682.
- Demirdağ, H., 2023, Dizel motorda etanol kullanımının motor parametrelerine etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Karabük.
- Deniz, O., İçten yanmalı motorlar ders notları, Yıldız Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü Otomotiv Anabilim Dalı, İstanbul, 2008.

- Erçek Serin, B., 2022. Çay tohumu biyodizelinin motorin ve etanol ile karışımlarının tek silindirli bir dizel motorda farklı enjektör basınçlarındaki motor performansı, egzoz ve gürültü emisyonlarına etkilerinin araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
- Ergeneman, M., Arslan, H., Kutlar, O.A. ve Mutlu, M., “Taşıt Egzozundan Kaynaklanan Kirleticiler”, *Birsan Yayınevi*, İstanbul, 13-14, 33-48 (1998).
- Ejder, S.B. (2007). Etanol-Dizel, Biyodizel-Dizel Yakıt Karışımlarının Kullanımının Motor Performansına Etkilerinin Deneysel Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Fayyazbaksh, A., Pirouzfard, V., (2017). Comprehensive overview on diesel additives to reduce emissions, enhance fuel properties and improve engine performance, Volume 74, July 2017, Pages 891-901.
- Fidan, M.S. ve Alkan, E., 2014, Bitkisel Hammaddelerden Elde Edilen Biyodizelin Alternatif Enerji Kaynağı Olarak Kullanılması, Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü GÜFBED/GUSTIJ, 2014, 4 (2), 144-160.
- Ghadikolaei, M. A., Cheung, C. S., Yung, K. F. (2018) Study of combustion, performance and emissions of diesel engine fueled with diesel/biodiesel/alcohol blends having the same oxygen concentration, *Energy*, 157: 258-269.
- Goga, G., Chauhan, B. S., Mahla, S. K., & Cho, H. M. (2019). Performance and emission characteristics of diesel engine fueled with rice bran biodiesel and n-butanol. *Energy Reports*, 5, 78–83. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2018.12.002>
- Hanedar, E., 2021. Pirolitik Yakıt Ve Alkol Katkılarının Dizel Bir Motorda Yanmaya Ve Emisyonlara Olan Etkileri, Yüksek Lisans Tezi, Düzce Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Düzce.
- Hazar H., Temizer İ., Gür F., 2011. Bir dizel motorunun performansı ve motor parçaları üzerinde katkı maddelerinin etkisinin incelenmesi, *6th International Advanced Technologies Symposium (IATS'11)*, Elazığ, Turkey.
- Hışır, V., 2009, Bütanol-Benzin Karışımlarının Buji ile Ateşlemeli Motorların Performans ve Egzoz Emisyonlarına Etkilerinin Deneysel Olarak Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük.
- https://www.enerjiatlası.com/rezerv/dunya-petrol-rezervi.html#google_vignette [Ziyaret Tarihi: 14 Ocak 2024].

- İlhan, M., 2007, Çift yakıtlı (dizel ve metanol) bir dizel motorda püskürtme avansının performans ve emisyonlara etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- İlkılıç, C., Behçet, R. Aydın, S., Aydın, H., 2009, Dizel motorlarında azot oksitlerin oluşumu ve kontrol yöntemleri, *5.Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu(IATS'09)*, Karabük, 1: 2062-2066.
- Kulakoğlu, T., 2009. “Dizel-Metanol Karışımı Kullanılan Bir Dizel Motorda Püskürtme Basıncının Performans ve Emisyonlara Etkisi”, Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Kumar, S., Cho, J. H., Park, J., Moon, I. (2013). Advances in diesel–alcohol blends and their effects on the performance and emissions of diesel engines. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 22:46-72.
- Kumar, V., Singh, A.P., Agarwal, A. K., (2020) Gaseous emissions (regulated and unregulated) and particulate characteristics of a medium-duty CRDI transportation diesel engine fueled with diesel-alcohol blends. *Fuel*, 278: 11826915.
- Kuşin, C., 2022, Biyodizel-Dizel Yakıt Karışımına n-Bütanol ve Metanol İlavesinin İçten Yanmalı Bir Motorun Performans ve Emisyonlarına Etkisinin Deneysel Olarak İncelenmesi, Bitlis Eren Üniversitesi-Erciyes Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Bitlis-Kayseri.
- Lapuerta, M., Armas, O., Herreros, J.M., 2008, Emissions from a diesel-bioethanol blend in an automotive diesel engine. *Fuel*; 87(1):25e31.
- Ma, B., Yao, A., Yao, C., Wang, W., Ai, Y., (2021), methanol and formaldehyde in diesel methanol dual fuel engine with different valve overlap, *Applied Energy* 300 (2021) 117355.
- Najafi, G., Yusaf, T.F., (2009), Experimental investigation of using methanol-dizel blended fuels in diesel engine, *Proceedings of the Fourth International Conference on Thermal Engineering: Theory and Applications* January 12-14, 2009, Abu Dhabi, UAE.
- Ning, L., Duan, Q., Chen, Z., Kou, H., Liu, B., Yang, B., Zeng K., (2020). A comparative study on the combustion and emissions of a non-road common rail diesel engine fueled with primary alcohol fuels (methanol, ethanol, and n-butanol)/diesel dual fuel. *Volume 266*, 15 April 2020, 117034.

- Nour, M., Attia, A., Nada, S., (2019), "Combustion, performance and emission analysis of diesel engine fuelled by higher alcohols (butanol, octanol and heptanol)/diesel blends", *Energy conversion and management*, 185: p. 313-329.
- Örs, A., 2016, Biyodizel bütanol karışımlarının motor performansına ve egzoz emisyonlarına etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük.
- Özer, S. (2010). Bütanol Kullanımının Dizel Motor Performansı ve Egzoz Emisyonlarına Etkilerinin Deneysel Olarak Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük.
- Özer, S., Akçay, M., Gölcü, M., & Yazıcı, H. (2012). Tek Silindirli Benzinli Bir Motorda Kısmi Yüklerde Bütanol İlavesinin Performansa ve Emisyonlara Etkisi. *Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi/ Journal of Thermal Science and Technology*, 32(2), 55–62.
- Özer, S., 2014, Alkollerin içten yanmalı motorlarda alternatif yakıt olarak kullanılması, *Uludağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, Cilt 19, Sayı 1
- Pireli, E., 2006, Biyodizel ve dizel ile çalışan tek silindirli dizel bir motorda püskürtme basıncının motor performansına etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük.
- Sarıdemir, S., Yıldız, G., Hanedar, E., (2021), Effect of diesel-methanol blends on performance and combustion characteristics of diesel engine, *Düzce University Journal of Science & Technology*, 9 (2021) 189-201.
- Sayın, C., Çanakçı, M. And Uslu, K., "Influence of injection timing on the exhaust emissions of a dual-fuel CI engine", *Renewable Energy*, 23 (4): 21-50 (2007).
- Sekmen, Y., 2007, Karpuz çekirdeği ve keten tohumu yağı metil esterinin dizel motorda yakıt olarak kullanılması, *Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Teknoloji Dergisi*, 10(4): 295-302.
- Singh, R., Singh, S., & Kumar, M. (2020). Impact of n-butanol as an additive with eucalyptus biodiesel-diesel blends on the performance and emission parameters of the diesel engine. *Fuel*, 277, 118178. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.118178>
- Sharon, H., Ram, P., Fernando, K., Murali, S., (2013), "Fueling a stationary direct injection diesel engine with diesel-used palm oil–butanol blends—an experimental study", *Energy conversion and management*, 73: p. 95-105.

- Uludağ, V.K., 2010, “Biyodizel kullanımında püskürtme avansının performans ve emisyonlara etkisi”, Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Uslu, K., Dizel motorlarda farklı püskürtme avanslarında dizel yakıtı+etanol kullanımının performans ve emisyonlara etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Wei, L., Yao, C., Han, G., Pan, W., (2016), Effects of methanol to diesel ratio and diesel injection timing on combustion, performance and emissions of a methanol port premixed diesel engine, *Energy* 95 (2016) 223-232.
- Xiao, H., Guo, F., Wang, R., Yang, X., Li, S., & Ruan, J. (2020). Combustion performance and emission characteristics of diesel engine fueled with iso-butanol/biodiesel blends. *Fuel*, 268, 117387. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.117387>
- Yanbuloğlu, B., 2020, Dizel bir motorda dizel, piroliz yağı ve bütanol yakıt karışımının motor performans ve emisyonlarına etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Karabük.
- Yaylamış, H.B., 2019, Bir dizel motoruna metanol fumigasyonu ve EGR uygulamasının etkilerinin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Sakarya.
- Yeşilyurt, M.K., 2017, Biyodizel-dizel yakıt karışımlarına farklı alkol ilavelerinin dizel motorlarda performans, yanma ve emisyon karakteristiklerine etkilerinin incelenmesi, Doktora Tezi, Bozok Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yozgat.
- Yeşilyurt M. K., 2020, Dizel yakıtına farklı ağır alkoller(1-Bütanol, 1-Pentanol ve 1-Hekzanol) İlave Edilmesinin Tek Silindirli Bir Dizel Motorunun Performans, Yanma ve Egzoz Emisyon Karakteristiklerine Etkileri, *Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi*, Cilt/Volume:12 Sayı/Issue:2 Haziran/June 2020, 397-426.
- Yılmaz, N., Vigil, F. M., Benalil, K., Davis, S. M., & Calva, A. (2014). Effect of biodiesel-butanol fuel blends on emissions and performance characteristics of a diesel engine. *Fuel*, 135, 46–50. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2014.06.022>
- Yusaf, T., Hamawand, I., Baker, P., Najafi, G., (2013), The effect of methanol-diesel blended ratio on CI engine performance, *International Journal of Automotive and Mechanical Engineering (IJAME)*, ISSN: 2229-8649 (Print); ISSN: 2180-1606 (Online); Volume 8, pp. 1385-1395, July-December 2013.

- Yusri, I.M., R., Najafi, G., Razman, A., Awad, O.I., Azmi, W.H., Ishak, W.F.W., Shaiful, A.I.M., Alcohol based automotive fuels from first four alcohol family in compression and spark ignition engine: A review on engine performance and exhaust emissions. Volume 77, September 2017, Pages 169-181.
- Zaharin, M.S.M., Abdullah, N.R., Najafi, G., Sharudin, H., Yusaf, T., (2017). Effect of physicochemical properties of biodiesel fuel blends with alcohol on diesel engine performance and exhaust emissions, A review. Volume 79, November 2017, Pages 475-493.
- Zhang, Z.; Tian, J.; Li, J.; Ji, H.; Tan, D.; Luo, J.; Jiang, Y.; Yang, D.; Cui, S. Effects of Different Mixture Ratios of Methanol-Diesel on the Performance Enhancement and Emission Reduction for a Diesel Engine. Processes 2021, 9, 1366. <https://doi.org/10.3390/pr9081366>