

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**OTOMOTİV MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**ETANOL-MOTORİN KARIŞIMLARI KULLANILAN BİR DİZEL  
MOTORDA FARKLI ENJEKSİYON STRATEJİLERİNİN  
YANMA KARAKTERİSTİKLERİ ÜZERİNE ETKİSİNİN  
İNCELENMESİ**

**MUSTAFA VARGÜN**

**KOCAELİ 2021**

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**OTOMOTİV MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**ETANOL-MOTORİN KARIŞIMLARI KULLANILAN BİR DİZEL  
MOTORDA FARKLI ENJEKSİYON STRATEJİLERİNİN  
YANMA KARAKTERİSTİKLERİ ÜZERİNE ETKİSİNİN  
İNCELENMESİ**

**MUSTAFA VARGÜN**

**Prof. Dr. Ahmet Necati ÖZSEZEN**  
Danışman, Kocaeli Üniv.

.....

**Prof. Dr. Mustafa ÇANAKCI**  
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniv.

.....

**Prof. Dr. Cenk SAYIN**  
Jüri Üyesi, Marmara Üniv.

.....

**Tezin Savunulduğu Tarih: 28.01.2021**

## **ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR**

Yüksek lisans tez çalışmamın yönlendirilmesinde benimle gerekli tüm tecrübe ve bilgi birikimini paylaşan, tez araştırma konumda bana yol gösteren, deneysel ve teorik yaptığım bütün çalışmalarda bana yardımcı olan ve desteklerini esirgemeyen, tez danışman hocam Prof. Dr. Ahmet Necati ÖZSEZEN'e, yaptığım deneylerin yürütülmesinde bana yardımcı olan Makine Yüksek Mühendisi Mersin HÜRPEKLİ'ye, tez çalışmalarımı destekleyen Kocaeli Üniversitesi BAP Proje Birimine (2018/062) teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca, beni topluma yararlı bir birey olarak yetiştiren ve hiçbir konuda desteğini esirgemeyen annem ve babam başta olmak üzere tüm aileme teşekkür ederim.

Ocak – 2021

Mustafa VARGÜN

## İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR .....	i
İÇİNDEKİLER .....	ii
ŞEKİLLERİ DİZİNİ .....	iv
TABLolar DİZİNİ .....	v
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ .....	vi
ÖZET .....	viii
ABSTRACT .....	ix
GİRİŞ .....	1
1. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI .....	6
2. ETANOL'ÜN GENEL ÖZELLİKLERİ .....	19
2.1. Etanol'ün İçten Yanmalı Motorda Kullanımı .....	19
2.2. Dünyada Etanol .....	19
2.3. Türkiye'de Etanol .....	21
3. MATERYAL VE YÖNTEM .....	23
3.1. Materyal .....	23
3.1.1. Test yakıtları .....	23
3.1.2. Test yakıtlarının hazırlanması ve faz ayrışmasının gözlemlenmesi .....	23
3.1.3. Motor test düzeneği .....	25
3.2. Motor Testleri .....	30
3.2.1. Testlerin yapılışı ve test şartları .....	30
3.3. Yöntem .....	31
3.3.1. Yanma fazlarının hesaplanması .....	32
3.3.2. Isı dağılımının termodinamik modellenmesi .....	33
4. BULGULAR VE TARTIŞMA .....	35
4.1. Farklı Enjeksiyon Başlangıç Zamanlarının Etkileri .....	35
4.1.1. Fren özgül yakıt tüketimi .....	35
4.1.2. Isı dağılım oranı .....	37
4.1.3. Silindir gaz basıncı .....	37
4.1.4. Karbonmonoksit (CO) emisyonu .....	41
4.1.5. Karbondioksit (CO <sub>2</sub> ) emisyonu .....	41
4.1.6. Amonyak (NH <sub>3</sub> ) emisyonu .....	43
4.1.7. Azotoksit (NO <sub>x</sub> ) emisyonu .....	45
4.2. Pilot Enjeksiyonun Etkileri .....	47
4.2.1. Fren özgül yakıt tüketimi .....	47
4.2.2. Isı dağılım oranı .....	47
4.2.3. Silindir gaz basıncı .....	49
4.2.4. Karbonmonoksit (CO) emisyonu .....	49
4.2.5. Karbondioksit (CO <sub>2</sub> ) emisyonu .....	52
4.2.6. Amonyak emisyonu (NH <sub>3</sub> ) .....	53
4.2.7. Azotoksit (NO <sub>x</sub> ) emisyonu .....	54
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER .....	57
5.1. Sonuçlar .....	57
5.2. Öneriler .....	61

KAYNAKLAR.....	62
KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER.....	68
ÖZGEÇMİŞ.....	69



## ŞEKİLLERİ DİZİNİ

Şekil 3.1.	Etanol-Dizel yakıt karışımlarına 2-bütanol etkisi .....	25
Şekil 3.2.	Motor test düzeneği .....	26
Şekil 3.3.	Deney düzeneği şematik görünümü .....	28
Şekil 3.4.	Püskürtme başlangıç zamanlaması değişiminin gösterimi .....	31
Şekil 3.5.	Yanma fazları .....	32
Şekil 4.1.	Enjeksiyon başlangıç zamanının özgül yakıt tüketimi üzerine etkisi .....	36
Şekil 4.2.	Enjeksiyon başlangıç zamanının ısı dağılım oranı üzerine etkisi .....	38
Şekil 4.3.	Enjeksiyon başlangıç zamanının silindir gaz basıncı üzerine etkisi .....	40
Şekil 4.4.	Enjeksiyon başlangıç zamanının CO emisyonu üzerine etkisi .....	42
Şekil 4.5.	Enjeksiyon başlangıç zamanının CO <sub>2</sub> emisyon üzerine etkisi .....	43
Şekil 4.6.	Enjeksiyon başlangıç zamanının NH <sub>3</sub> emisyon üzerine etkisi .....	44
Şekil 4.7.	Enjeksiyon başlangıç zamanının NO <sub>x</sub> emisyonu üzerine etkisi .....	46
Şekil 4.8.	Pilot enjeksiyon stratejilerinin özgül yakıt tüketimi üzerine etkisi .....	48
Şekil 4.9.	Pilot enjeksiyon stratejilerinin ısı dağılım oranı üzerine etkisi .....	50
Şekil 4.10.	Pilot enjeksiyon stratejilerinin silindir gaz basıncı üzerine etkisi .....	51
Şekil 4.11.	Pilot enjeksiyon stratejilerinin CO emisyonu üzerine etkisi .....	52
Şekil 4.12.	Pilot enjeksiyon stratejilerinin CO <sub>2</sub> emisyonu üzerine etkisi .....	54
Şekil 4.13.	Pilot enjeksiyon stratejilerinin NH <sub>3</sub> emisyonu üzerine etkisi .....	55
Şekil 4.14.	Pilot enjeksiyon stratejilerinin NO <sub>x</sub> emisyonu üzerine etkisi .....	56

## TABLolar DİZİNİ

Tablo 2.1.	Kullanılan ham madde potansiyelleri .....	19
Tablo 2.2.	Dünya yakıt etanol üretimi (Milyon Galon) .....	20
Tablo 2.3.	Türkiye etanol üretimi .....	22
Tablo 3.1.	Yakıt içerikleri tablosu .....	24
Tablo 3.2.	Yakıt özellikleri.....	24
Tablo 3.3.	Tek silindirli deney motorun özellikleri .....	27
Tablo 3.4.	Hata analiz değerleri.....	27
Tablo 3.5.	Yakıt kütle akış ölçer teknik özellikleri.....	28
Tablo 3.6.	Hava kütle ölçer teknik özellikleri .....	29
Tablo 3.7.	Basınç ölçüm cihazı teknik özellikleri .....	29
Tablo 3.8.	Supercharger teknik özellikleri .....	29
Tablo 3.9.	Test şartları tablosu .....	30

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

$\bar{c}_v$	: Sabit Hacimde Ortalama Özgül Isı
$h_g$	: Isı Değişim Katsayısı
$dV$	: Silindir Hacmindeki Değişim
$dW$	: Piston Hareketinden Dolaylı Kaynaklanan İş
$dQ_w$	: Silindir Duvarından Kaynaklan Isı Kaybı
$dQ_{hr}$	: Yanma Sonucu Açığa Çıkan Isı Enerjisi
$dU_s$	: İç Enerjideki Değişim
$m$	: Sıkıştırılmış Kütle
$\theta_{YB}$	: Yanma Başlangıcındaki Krank Mili Açısı
$\theta_{YS}$	: Yanma Sonundaki Krank Mili Açısı
$\theta_{YF}$	: Krank Mili Açısı Cinsinden Yanma Süresi
$\theta_{TG}$	: Krank Mili Açısı Cinsinden Tutuşma Gecikmesi Süresi
$p$	: Silindir Gaz Basıncı
$R$	: Özgül Gaz Sabiti
$S_w$	: Silindir Duvar Yüzeyi
$v/v$	: Hacimsel Oran
$T$	: Silindir Gaz Sıcaklığı
$T_w$	: Silindir Duvar Sıcaklığı
$\gamma$	: Belirli Isıların Oranı

## Kısaltmalar

B10	: % 10 Bütanol + % 90 Fosil Kökenli Dizel Yakıtı
CO	: Karbonmonoksit
CO <sub>2</sub>	: Karbondioksit
C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH	: Etanol
EKÜ	: Elektronik Kontrol Ünitesi
E5B1	: % 5 Etanol + % 1 2-Bütanol + % 94 Fosil Kökenli Dizel Yakıtı
E10B2	: % 10 Etanol + % 2 2-Bütanol + % 88 Fosil Kökenli Dizel Yakıtı
E20	: % 20 Etanol + % 80 Fosil Kökenli Dizel Yakıtı
E85	: % 85 Etanol + % 15 Benzin
FKDY	: % 100 Fosil Kökenli Dizel Yakıt
FFV	: Flexible Fuel Vehicles (Esnek Yakıtlı Araçlar)
H <sub>2</sub> O	: Su
HC	: Hidrokarbon
IDO	: Isı Dağılım Oranı
IBE	: Isopropanol-Bütanol-Etanol
IBE15	: % 15 Isopropanol-Bütanol-Etanol + % 85 Fosil Kökenli Dizel Yakıtı
IBE30	: % 30 Isopropanol-Bütanol-Etanol + % 70 Fosil Kökenli Dizel Yakıtı
IEA	: International Energy Agency (Uluslararası Enerji Ajansı)
IRENA	: International Renewable Energy Agency (Uluslararası Yenilenebilir Enerji Ajansı)



KA	: Krank Açısı
M10	: % 10 Metanol + % 90 Fosil Kökenli Dizel Yakıtı
Mt	: Milyon Ton
Mtoe	: Milyon Ton Eşdeğer Petrol
NO <sub>x</sub>	: Azot Oksitler
NH <sub>3</sub>	: Amonyak
O <sub>2</sub>	: Oksijen
OECD	: Organisation for Economic Co-operation and Development (İktisadi ve İşbirliği Teşkilatı)
ÖYT	: Özgül Yakıt Tüketimi
PB	: Enjeksiyon Başlangıcı
PM	: Partikül Madde
PS	: Enjeksiyon Sonu
ÜÖNÖ	: Üst Ölü Noktadan Önce
ÜÖN	: Üst Ölü Nokta
Vol	: Volume (Hacim)
WHO	: World Health Organization (Dünya Sağlık Örgütü)
YB	: Yanma Başlangıcı
YF	: Yanma Süresi
YS	: Yanma Sonu

# ETANOL-MOTORİN KARIŞIMLARI KULLANILAN BİR DİZEL MOTORDA FARKLI ENJEKSİYON STRATEJİLERİNİN YANMA KARAKTERİSTİKLERİ ÜZERİNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ

## ÖZET

Dünyada ve ülkemizde günden güne artan taşıt sayısı enerji kaynağı olarak fosil kökenli yakıt kullanımını da arttırmakta ve fosil kökenli yakıtların yanması sonucu açığa çıkan egzoz emisyonları da çevreyi kirletip sera etkisine sebep olarak dünyamızı tehdit eder hale gelmiştir. Fosil kökenli yakıtların kullanımı ile taşıtlardan salınan egzoz emisyonlarının azaltılması için fosil kökenli yakıtlar ile karışım oluşturacak yakıtların araştırılmasına hız verilmiştir. Ayrıca, fosil kökenli yakıtların dünyada sınırlı miktarda bulunması, sürdürülebilir olmaması, maliyetlerinin yüksekliği ve fiyat dalgalanmalarının tahmin edilemeyeceği araştırmaları hızlandırmıştır. Alkol yakıtlarını yerel tarım ürünlerinde üretilebilir ve yakıt özelliklerinin fosil kökenli yakıtlarla karışım oluşturmaya uygun olmasından dolayı kullanım potansiyeli yüksektir. İçten yanmalı motorların gelişimi sürekli devam etmektedir ve gelişim parametrelerinin üzerine enjeksiyon stratejilerinin önemi büyüktür. Bu çalışma, sabit 1600 d/d ve %50 yük altında tek silindirli direkt püskürtmeli bir dizel motorda 2-bütanol-etanol-dizel yakıt karışımları kullanılarak enjeksiyon stratejilerinin (enjeksiyon başlangıç zamanı ve pilot püskürtme oranı) yanma ve egzoz emisyon karakteristikleri üzerine etkisi incelenmiştir. Çalışma kapsamında, hacimsel olarak %100 fosil kökenli dizel yakıt, %94 dizel-%5 etanol-%1 2-bütanol ve %88 dizel-%10 etanol-%2 bütanol yakıtları kullanılarak klasik (ana) enjeksiyon başlangıç zamanı olan 10,4° Krank Açısında (KA) Üst Ölü Noktadan Önce (ÜÖNÖ) ve enjeksiyon başlangıç zamanı 2° KA ÜÖN'ya yaklaştırıp uzaklaştırılması ile yakıtlar püskürtüldü. Yakıtlar ayrıca klasik enjeksiyon başlangıç zamanında ana, %5 pilot ve %10 pilot püskürtmeler gerçekleştirilerek özgül yakıt tüketimi (ÖYT), silindir gaz basıncı, ısı dağılım oranı, CO<sub>2</sub>, CO, NH<sub>3</sub> ve NO<sub>x</sub> emisyonlarındaki değişimler gözlemlenmiştir. Deneyler sonucunda alınan veriler referans yakıtı olan %100 fosil kökenli dizel yakıt sonuçlarıyla kıyaslanmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Dizel Motor, Egzoz Emisyonları, Etanol, Püskürtme Karakteristikleri, Yanma.

# INVESTIGATION OF THE EFFECTS OF DIFFERENT INJECTION STRATEGIES ON COMBUSTION CHARACTERISTICS IN A DIESEL ENGINE USING ETHANOL-DIESEL MIXTURES

## ABSTRACT

The number of vehicles increasing day by day in the World and in our country also increases the use of fossil-based fuel as an energy source, and the exhaust emissions resulting from the burning of fossil-based fuels have become a threat to our World by polluting the environment and causing greenhouse effect. In order to reduce the exhaust emissions from vehicles with use of fossil-based fuels, the search for fuels that will mix with fossil-based fuels has been accelerated. In addition, the limited availability of fossil-based fuels in the World, their unsustainability, high costs and unpredictability of price fluctuations have accelerated the researches. Alcohol fuels can be produced in local agricultural products and their use potential is high, as their fuel properties are suitable for blending with fossil-based fuels. The development of internal combustion engines have been continuing and injection strategies are of great importance over the development parameters. In this study, the effect of injection strategies (injection start time and injection amount) on engine performance and combustion characteristics using 2-butanol-ethanol-diesel fuel mixtures in a single-cylinder direct injection diesel engine at 1600 rpm and 50% load was investigated. In this study, using 100% fossil based diesel fuel, 94% diesel-5% ethanol-1% 2-butanol and 90% diesel-10% ethanol-2% 2-butanol fuels by volume, the classical (Main) injection start time was at 10.4° Crank Angle (CA) before the Top Dead Point (BTDC) and injection start time was advanced from 2° CA from TDC and retarded 2° CA to TDC, the fuels were sprayed. In addition, the fuels have been sprayed with main, 5% pilot and 10% pilot jets at the start time of the classical injection, and changes in specific fuel consumption (BSFC), cylinder gas pressure, heat release rate, CO<sub>2</sub>, CO, NH<sub>3</sub> and NO<sub>x</sub> emissions have been observed. The data obtained at the end of the experiments were compared with the results of 100% fossil based diesel fuel.

**Keywords:** Diesel Engine, Exhaust Emissions, Ethanol, Injection Characteristics, Combustion.

## GİRİŞ

Günümüzde endüstri, ulaşım, konut ve hizmet gibi alanlarda enerji kaynağı olarak petrol, doğal gaz, kömür, biyoyakıt, hidro, nükleer ve yenilenebilir enerji kaynakları kullanılmaktadır. Enerji kaynağı olarak en fazla arz edilen enerji türü fosil kökenli yakıtlar olmaktadır. Uluslararası Enerji Ajansı (IEA) verilerine göre dünya enerji arzında ilk sıra olan fosil yakıtlar 2018 yılında dünya enerji üretiminin %81'den fazlasını oluşturmuştur. 2018 yılında dünya enerji üretimi bir önceki yıla oranla yaklaşık %3,2'lik bir artış göstererek 14421 Mtoe (Milyon ton eş değer petrol) olmuştur. 2018 yılında enerji üretiminde fosil yakıtlar (doğal gaz, kömür ve petrol) toplam 370 Mtoe'den fazla artış gösterirken yenilenebilir enerji kaynaklarıyla üretim 60 Mtoe ve nükleer enerji ile üretim 19 Mtoe artmıştır [1]. Ek olarak, dünya toplam enerji arzı 1971 yılında 5519 Mtoe iken 2018 yılına geldiğimizde 2,5 kattan fazla artışla 14282 Mtoe olmuştur [2]. Bununla birlikte, dünyadaki toplam CO<sub>2</sub> emisyon miktarı da 1990 yılından 2017 yılına gelindiğinde %60,03 oranında artarak 32,840 Mt'a ulaşmıştır [3].

IEA verilerine göre dünya toplam nihai enerji tüketimi 1971 yılında 4243 Mtoe iken 2018 yılında geldiğimizde 9938 Mtoe olmuştur. 1971 yılından 2018 yılına kadar endüstri sektörü toplam enerjinin %38'ini kullanarak en büyük enerji tüketim sektörü konumunda kalmıştır ve konutta enerji tüketimi 1990 yılında toplam enerji tüketiminin %24'ünü oluştururken 2018 yılında %21'ini oluşturmuştur. 1971'den 2018 yılına geldiğimizde en büyük enerji kullanım artışı ulaşım alanında %23'den %29'a yükselerek gerçekleşmiştir [4].

Ülkemizin de üyesi olduğu İktisadi ve İşbirliği Teşkilatı'nın (OECD) ülkeleri 2018 yılında, Endüstri alanında enerji kaynağı olarak yaygın olan gaz, elektrik ve petrol kullanmıştır. Enerji kullanımında önemli derecede artış görünen ulaşım sektöründe 2000 yılından sonra hızla kullanımı yaygınlaşan biyoyakıtlara rağmen, OECD üye ülkeleri ulaşım alanında enerji ihtiyacının %92'sini petrolden elde etmiştir. Konut

alanında %38 ile en fazla gaz kullanılırken hizmetler alanında %53,5 ile elektrik en fazla tercih edilen enerji kaynağı olmuştur [5].

Fosil yakıtlarının kullanımı sonucu atmosferde hava kalitesi düşmektedir. Dünya üzerinde hava kirliliği hemen hemen herkesi etkilemektedir. Sadece 10 kişiden 1'i WHO'nün kriterlerine göre temiz denebilecek havaya ulaşabilmektedir [6]. Düşük hava kalitesi kalp hastalıklarını, akciğer kanserini ve astım dahil kronik ve akut solunum yolu hastalıkları riskini arttırmaktadır [7]. Dünya üzerinde her 9 ölümden 1'i hava kirliliği sebebiyle gerçekleşmektedir [8]. İstanbul'daki hava Dünya Sağlık Örgütü'nün (WHO) hava kirliliği kabul edilebilirlik seviyesinin 3,3 kat üzerindedir ve her yıl ülkemizde 33657 vatandaşımız hava kirliliği yüzünde hayatını kaybetmektedir [9].

IEA verilerine bakıldığında fosil kökenli yakıtlara dünyanın ne kadar bağımlı olduğu görülmektedir. Ancak fosil kökenli yakıtların dünya üzerinde sınırlı miktarda bulunuşu, maliyetlerinin yüksekliği, fiyat dalgalanmaları ve kullanımı sonucu çevreye salınan zararlı gazlar insan sağlığını ve çevre kirliliğini tetiklemektedir. Bu kapsamda ülkeler harekete geçerek çalışmalar yapmıştır. İlk olarak, iklim değişikliğinin kontrol altına alınması ve ozon tabakasının korunumunun incelenmesi Birleşmiş Milletler Çevre Programı ve Dünya Meteoroloji Örgütü'nün kurdukları Ozon Tabakası Koordinasyon Komitesi sonrası çalışmalarıyla başlamıştır [10]. Bu çalışmalar kapsamında zararlı gazların salınımının azaltılması için Mart 1985'de Viyana Sözleşmesi ve Eylül 1987'de Montreal Protokolü ülkeler tarafından imzalanmıştır [10,11]. Daha sonra, sera gazlarının kontrol altına alınması hedefi ile Şubat 2005'te ülkemizin de taraf olduğu Kyoto Protokolü yayınlanmış ve bu protokole göre gelişmiş ülkelerin 2008-2012 yılları arası sera gazı emisyonlarının 1990 yılı düzeyinin %5 altına indirmesini hedeflenmiştir [12]. Kyoto Protokolünün 2020 yılında son ermesi sebebiyle 2020 yılından sonra geçerli olmak koşuluyla Paris Anlaşması kabul edilmiştir. Paris Anlaşması kapsamında küresel ısınmanın kontrolü, iklim direncinin artırılması ve düşük sera gazı salınımları hedeflenmiştir [13].

Ülkemizin toplam enerji arzı 1990 yılından bu yana %186,27 oranında artarak 2018 yılında 146 Mtoe'a ulaşmıştır. Toplam CO<sub>2</sub> emisyon salınımı ülkemizde 1990 yılında 129 Mt iken 28 yıl sonra %187,60 oranında artarak 371 Mt olmuştur [14]. Bu

kapsamda, IEA'nın ülkemizin enerji politikalarını incelemesi sonucu petrol ve gaz ithalatında ve doğal gaza olan bağımlılık artışı görülmüştür. Bunun sonucunda, Türkiye ekonomisi petrol ve doğal gazdaki fiyat dalgalanmasına maruz kalmıştır. IEA, Türkiye'ye yaptığı öneride uzun vadeli bir enerji politikasının gerekliliğini vurgulayarak daha güvenli sürdürülebilir ve uygun maliyetli enerji kaynaklarına doğru yönlendirmeyi amaçlamıştır [15]. Son 15 yıllık süre zarfında, İktisadi ve İşbirliği Teşkilatı'nın (OECD) üye ülkeleri arasında yer alan ülkemiz enerjinin en hızlı arttığı ülke konumuna gelmiştir. Ülkemizin temel enerji strateji planları şu şekildedir [16];

- Enerji güvenliliği sağlanması için, ithal edilen petrol ve doğal gazın tedarikinde kaynak çeşitliliği,
- Sürdürülebilir kalkınma kapsamında, yerli ve yenilenebilir enerji payının artırılması,
- Rekabetçi piyasa ile üretkenliğin ve verimliliğin artırılması ile enerji verimliliğinin artırılması,
- Enerji ile ilgili AR-GE çalışmalarının artırılması amaçlanmaktadır.

Bu kapsamda, ülkemizin yenilenebilir enerjiye verdiği önemi Uluslararası Yenilenebilir Enerji Ajansı'nın (IRENA) kurucu üyelerin arasında yer alarak da güçlendirmiştir.

Fosil kökenli yakıtlara olan bağımlılığın azaltılması daha çevreci enerji kaynakları araştırmalarında, yerel kaynaklardan üretilebilir ve sürdürülebilir enerji kaynağı olarak taşıtlarda fosil kökenli yakıtlara ek olarak kullanılabilen alkol yakıtları öne çıkmaktadır. Bu kapsamda, Avrupa Birliği (AB) gibi konsorsiyumlar tarafından enerji kaynağı olarak fosil yakıtların kullanımını sınırlayıp biyoyakıt kullanımını teşvik edecek direktifler yayınlamaktadır [17]. AB tarafından 8 Mayıs 2003 yılında yayınlanan bir direktifte yenilenebilir yakıt kullanımını teşvik edilmektedir. Bu direktife göre; 31 Aralık 2005 tarihinde %2,3 oranında kullanımla başlamak üzere Aralık 2010 itibarıyla %5,75 kullanım olması 2020'de %10,0 ve 2030'da %25 biyoyakıt kullanımını hedeflenmiştir [18,19]. Ülkemizde, 30098 sayılı resmi gazetede yayınlanan regülasyonla ithal edilen akaryakıtta en az %3 (Vol.), oranında yerli tarım ürünlerinde elde edilen etanolün katılması zorunlu hale getirilmiştir.

Motor yükü ve karışım metoduna bağlı olarak belli oranlarda etanol, dizel yakıtına ek olarak sıkıştırma ateşlemeli bir motorda herhangi bir değişikliğe gerek kalmadan kullanılabilir [20]. Etanol'ün fosil kökenli yakıtta göre sahip olduğu yüksek alev hızı, yüksek buharlaşma ısısı ve yüksek oktan sayısı gibi özellikleri silindir içinde daha yüksek sıkıştırma oranına ve daha kısa yanma süresine izin vermektedir [21]. Yapılan çalışmalar göstermiştir ki fosil kökenli dizel yakıt ile kıyaslandığında, dizel-etanol yakıt karışımlarında %10'a kadar etanol kullanımı, motor performansında önemli bir değişikliğe sebep olmamaktadır [22]. Yapılan birçok çalışmada alkollerin dizel yakıtı ile karışım oluşturularak kullanılmasıyla silindir içindeki yanmanın iyileştiği görülmüştür [23]. Alkol yakıtların fosil kökenli dizel yakıtla karışım oluşturularak kullanılmasıyla motor performansına fazla bir etki etmeden egzoz emisyonlarını azalttığı görülmüştür [24].

Enjeksiyon stratejileri, içten yanmalı bir motorda performans, yanmanın gelişimi ve emisyonları kontrol etmek için en önemli parametrelerden biridir [25,26]. Guedes A. D. M. ve ark., yaptıkları çalışmada farklı enjeksiyon stratejileri uygulayarak maksimum silindir basıncını %9 arttırmış ve özgül yakıt tüketimini %4 azaltmıştır [27]. Enjeksiyon zamanlaması ile ilgili yapılan bir çalışmada, enjeksiyon avansı erkene alındıkça indike termik verim ile yanma veriminin arttığı görülmüştür ve özgül yakıt tüketimi azalmıştır. Maksimum indike termik veriminde en erken enjeksiyon avansında elde edilmiştir [28]. Püskürtme zamanlaması değiştirilerek NO<sub>x</sub> ve CO<sub>2</sub> egzoz emisyonlarında azalma görüldüğü gibi yapılan çalışma ile optimum performans ve yanma değerleri elde edilmiştir [29]. Dizel motorda enjeksiyon sisteminin görevlerini şu şekilde sıralayabiliriz [30];

- Sırası gelen silindire, püskürtülecek yakıt miktarı belirleyerek göndermek,
- Yakıt enjeksiyonunu hızlı bir şekilde gerçekleştirmek,
- Yakıtı silindir içerisine hava ile homojen karışım oluşturması için atomize ederek göndermek,
- Yakıtı istenilen zamanda silindirlere püskürtmektir.

Bu çalışmada, fosil kökenli dizel yakıtı motorin (FKDY) ve hacimsel olarak 2-bütanol-etanol-dizel karışımlarının (E5B1, E10B2) kullanıldığı tek silindirli bir dizel motorda enjeksiyon stratejilerinin (enjeksiyon başlangıç zamanı ve enjeksiyon miktarı)

değiştirilmesiyle 1600 d/d ve %50 motor yükünde testler gerçekleştirilmiştir. Enjeksiyon başlangıç zamanı değişimi ile yakıtlar ilk olarak silindir içerisine standart enjeksiyon zamanlaması olan 10,4 °KA üst ölü noktadan önce ve daha sonra püskürtme stratejilerine uygun olarak standart enjeksiyon zamanlaması  $\pm 2$  °KA değiştirilerek püskürtülmüştür. Enjeksiyon miktarı değişiminde her bir yakıt standart enjeksiyon başlangıç zamanı olan 10,4° KA'da ana püskürtme, %5 pilot ve %10 pilot enjeksiyon yapılarak gerçekleştirilmiştir. Alınan datalar referans değer olarak kabul edilen FKDY ile kıyas edilerek yorumlanmıştır.





## 1. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Genel olarak sıkıştırma ateşli motorlarda, yüksek enerji içeriğine sahip olan dizel yakıtı kullanılmaktadır. Petrol üretiminin belirli ülkelerin elinde bulunması, petrol fiyatlarındaki dalgalanmalar ve çevresel problemler araştırmacıları alternatif yakıt arayışlarına sevk etmiştir. Yakıt özelliklerinin FKDY'a yakın olmasından dolayı etanol yakıtı kullanımı büyük ilgi görmüştür. Etanol'ün dizel motorda herhangi bir değişikliğe gerek kalmadan belirli oranlarda FKDY ile beraber kullanılabilmesi, performans testlerinde herhangi bir probleme rastlanmaması ve yerel kaynaklardan üretilebilmesi etanol'ü ön plana çıkaran faktörlerdendir. Ayrıca, etanol egzoz emisyon standartlarını yakalamak için kullanılan egzoz emisyon sistemlerine zarar vermemektedir. Bu bağlamda, literatürde FKDY-etanol karışım yakıtları kullanılarak çeşitli çalışmalar yapılmıştır.

Murcak ve ark., [38] tarafından tek silindirli bir dizel motorda enjeksiyon zamanlaması  $25^\circ$  KA (Krank Açısı) üst ölü noktadan önceden (ÜÖNÖ)  $55^\circ$  KA'a değiştirilmiş ve fosil kökenli dizel yakıtı (FKDY) ile etanol yakıtı belli oranlarda karıştırarak (E5,E10 ve E20) testler yapmışlardır. Maksimum motor gücü 2400 d/d'da E5 yakıtı ile  $35^\circ$  KA ÜÖNÖ'de 8,25 kW olarak elde etmişlerdir. FKDY yakıtı kullanıldığında motor gücü 7,59 kW olarak elde edilmişken karışım oranındaki etanol oranı %20 olduğunda motor gücü 7,41 kW'a düştüğünü görmüşlerdir. Maksimum motor torku E5 yakıtı kullanımında 1200 d/d'da ve  $25^\circ$  KA ÜÖNÖ püskürtme başlangıç zamanında 38,68 Nm olarak elde etmişlerdir. Ayrıca fren özgül yakıt tüketimi için alınan değerler kıyaslandığında standart dizel yakıt değerlerine göre etanol-dizel yakıt karışımlarındaki etanol miktarı arttıkça özgül yakıt tüketiminde %8-11 arasında kötüleşme görmüşlerdir. Minimum özgül yakıt tüketim değeri FKDY yakıtı ile 348 g/kWh olarak 1000 d/d'da ve  $35^\circ$  KA ÜÖNÖ enjeksiyon avansında elde etmişlerdir.

Li ve ark., [39] yaptıkları çalışmada IBE-dizel (% 15 IBE % 85 Dizel ve % 30 IBE % 70 Dizel) yakıt karışımları ve saf dizel yakıtının kullanıldığı bir dizel motorda performans, yanma ve emisyon karakteristiklerini incelemişlerdir. Yapılan çalışmada

pilot (25, 30, 35, 40 ve 45° KA ÜÖNÖ) ve ana (6, 9, 12, 15 ve 18° KA ÜÖNÖ) enjeksiyon zamanları değiştirilerek testler yapmışlardır. Tüm test yakıtlarında ana enjeksiyon başlangıç zamanı 6° KA'dan 15° KA açısına doğru erkene alındıkça CO ve HC emisyonlarında azalma görülürken 18° KA açısında CO ve HC emisyonlarında artış görmüşlerdir. Dizel yakıtı ile karşılaştırıldığında tüm ana enjeksiyon zamanlarında karışımdaki IBE oranı arttıkça tutuşma gecikmesi süresinin arttığını görmüşlerdir. 6° KA ÜÖNÖ enjeksiyon başlangıç zamanında her bir yakıt için maksimum yanma süresi elde etmişlerdir. Her bir yakıt için enjeksiyon başlangıç zamanı 6° KA'dan 18° KA'a kadar erkene alındıkça silindir içi basıncın arttığını gözlemlemişlerdir. Bu çalışmada IBE15 yakıtı ile ana enjeksiyon 9° KA ve pilot enjeksiyon 30° KA optimum yakıt tipi olarak tespit etmişlerdir. Bu yakıt tipi ile düşük ÖYT elde edilmiştir. Ayrıca IBE15 yakıtı ile NO<sub>x</sub> ve is emisyonlarını düşük seviyede tutmuşlardır.

Liu ve ark., [40] yaptıkları çalışmada, fosil kökenli dizel yakıtı (FKDY) ve farklı oranda etanol-dizel yakıt karışımları kullanarak (E10 ve E20) ve farklı enjeksiyon stratejileri uygulayarak (2,5-22,5° KA ÜÖNÖ) dört silindirli bir dizel motorda yanma ve egzoz emisyonları üzerine etkisini incelemişlerdir. Enjeksiyon zamanlamasının ÜÖN'dan uzaklaştırılması ile silindir gaz basıncının arttığını görmüşlerdir. Aynı enjeksiyon başlangıç zamanında (7,5° KA ÜÖNÖ) maksimum silindir gaz basıncı FKDY yakıtı ile elde edilirken karışımdaki etanol oranı arttıkça silindir gaz basıncında hafif bir azalma görmüşlerdir. Tüm yakıt tipleri için maksimum tutuşma gecikmesi süresi 2,5 °KA ÜÖNÖ elde edilirken aynı zamanda FKDY yakıtı ile kıyaslandığında karışım oranındaki etanol oranı arttıkça tutuşma gecikmesi süresi artarken yanma süresinin kısaldığını tespit etmişlerdir. Enjeksiyon zamanlamasının ÜÖN'ya yaklaştırılmasıyla daha düşük PM emisyonu elde edilirken enjeksiyon zamanlaması 12,5° KA ÜÖNÖ'da PM emisyonları daha yüksek bulmuşlardır. 2,5° KA ÜÖNÖ enjeksiyon başlangıç zamanında, fosil kökenli dizel yakıtı ile karşılaştırıldığında E10 yakıtı kullanımında yaklaşık %42,5 ve E20 yakıtı kullanımında yaklaşık %62 oranında PM emisyonlarında azalma görmüşlerdir.

Sayın ve ark., [41] yaptıkları çalışmada farklı oranlarda etanol-dizel (%5, %10 ve %15) karışımlarının kullanımında farklı enjeksiyon zamanlamalarının (21° KA, 24° KA, 27° KA, 30° KA ve 33° KA ÜÖNÖ) tek silindirli dört zamanlı bir dizel motorda

emisyona üzerine etkisini incelemişlerdir. Karışım yakıtındaki etanol oranı arttıkça NO<sub>x</sub> ve CO<sub>2</sub> emisyonlarında artış gözlemlenirken CO ve HC emisyonlarında azalma görmüşlerdir. Orijinal enjeksiyon zamanlamasına göre (27° KA ÜÖNÖ) enjeksiyon başlangıç zamanının ÜÖN'ya yaklaştırıldığında (21° KA ve 24° KA ÜÖNÖ) NO<sub>x</sub> ve CO<sub>2</sub> emisyonları artmış ancak HC ve CO emisyonlarında azalma tespit etmişlerdir. Orijinal enjeksiyon başlangıç zamanına göre enjeksiyon başlangıç zamanı ÜÖN'dan uzaklaştırıldığında (30° KA ve 33° KA) HC ve CO emisyonları azalırken NO<sub>x</sub> ve CO<sub>2</sub> emisyonlarında artış görmüşlerdir.

Tutak ve ark., [42] yaptıkları çalışmada bir dizel motorda farklı enjeksiyon zamanlarında (3,5°-23,5° KA'na 2,5° KA arttırarak) dizel yakıt ve farklı oranlarda (%20 ve %50) dizel-E85 (%85 etanol-%15 Benzin) yakıt karışımlarının kullanılarak performans ve emisyon üzerine etkisini incelemişlerdir. Maksimum silindir basıncı %50 dizel-E85 yakıt karışımı ile 23,5° KA ÜÖNÖ'de dizel yakıtla kıyaslandığında yaklaşık %30 artış ile elde etmişlerdir. Karışımındaki E85 yakıt oranı arttıkça tutuşma gecikmesi süresinde artış görmüşlerdir. Dizel yakıtla kıyaslandığında %20 E85-dizel yakıt karışımında yanma süresi 2 kat azalma izlemişlerdir. Dizel yakıt ile kıyaslandığında, enjeksiyon başlangıç zamanı ÜÖN'dan uzaklaştırıldıkça ve karışımındaki E85 yakıt oranı arttıkça is emisyonlarında azalma görülürken NO emisyonlarında artış gözlemlenmiştir.

Emiroğlu ve ark., [43] farklı yükler altında çeşitli alkol yakıtları (Metanol, Etanol ve Bütanol) ile dizel yakıtlarını karıştırarak, yanma, performans ve egzoz emisyonlarını incelemişlerdir. Yapılan testlerde metanol-dizel (M10), etanol-dizel (E10) ve bütanol-dizel (B10) karışımlardaki alkol yakıt oranı %10 olarak hazırlanmışlardır. Ayrıca referans yakıtı olarak da fosil kökenli dizel yakıt (FKDY) kullanmışlardır. Sonuç olarak kullanılan alkol yakıt karışımları ile FKDY yakıtından daha uzun tutuşma gecikmesini izlemişlerdir. Silindir gaz basınç değerleri izlendiğinde E10 yakıt kullanımı ile elde edilen maksimum silindir basıncı M10 ve FKDY yakıt kullanımıyla elde edilen değerlerden daha yüksek olduğu görülürken B10 yakıtı kullanımı ile elde edilen silindir basınçlarından az olduğunu tespit etmişlerdir. 10 Nm yük altında elde edilen ısı dağılım oranları karşılaştırıldığında tüm yakıtlar arasında maksimum ısı dağılım oran değeri E10 yakıtı ile gözlemlenmiştir. Dizel yakıtla kıyaslandığında, karışım yakıtları kullanımı ile ÖYT değerinde artış izlemişlerdir. Fosil kökenli dizel

yakıt ile karışım yakıtları karşılaştırıldığında elde edilen NO<sub>x</sub> emisyon değerlerinde bir artış görülürken CO emisyonlarında azalma görmüşlerdir.

Prabakaran ve ark., [44] tek silindirli bir dizel motorda dizel yakıtı ve dizel yakıtı ile etanol karıştırılarak ayrıca karışımın istikrarının artırılması için bütanol eklenerek (%45 dizel - %45 etanol - %10 bütanol-D45E45B10) motor çalışma parametreleri değiştirilip performans, yanma ve egzoz emisyonları üzerine etkisini incelemişlerdir. Enjeksiyon zamanlaması 23-26-29° KA ÜÖNÖ'de testler gerçekleştirmişlerdir. Testler sonucunda motorun optimum çalışma parametreleri olarak enjeksiyon başlangıç zamanı 29° KA ÜÖNÖ, enjeksiyon basıncı 190 bar ve sıkıştırma oranı olarak 19:1 değerlerini belirlemişlerdir. Dizel yakıtı ile elde edilen silindir gaz basınç değeri D45E45B10 yakıtı kullanımından daha yüksek bulunurken ısı dağılım oranı değerleri birbirine çok yakın bulmuşlardır. D45E45B10 yakıt kullanımıyla elde edilen NO<sub>x</sub> emisyon değerleri dizel yakıtı ile elde edilen değerlerden daha düşük olduğu izlenirken CO emisyon değerlerinde artış izlemişlerdir. Bu çalışma sonucunda %55 oranında dizel yakıt kullanımı azaltılıp alternatif yakıt kullanımının mümkün olduğunu tespit etmişlerdir.

Park ve ark., [45] yaptıkları çalışmada 4 zamanlı ve common rail yakıt enjeksiyon sistemine sahip bir dizel motorda etanol-dizel-biyodizel yakıt karışımlarını kullanmışlar ve referans yakıt olarak %100 fosil kökenli dizel yakıtını almışlardır. Test sonuçlarında enjeksiyon zamanlamasının ÜÖN'dan uzaklaştırılması ile tüm yakıt tiplerinde maksimum silindir gaz basıncında artış izlemlerdir. Karışımlardaki etanol oranı arttıkça ve enjeksiyon zamanlaması ÜÖN'ya yaklaştırıldıkça NO<sub>x</sub> emisyonlarında azalma izlerken HC ve CO emisyonlarında artış tespit etmişlerdir.

Sayin ve ark., [46] tek silindirli bir dizel motorda enjeksiyon zamanlaması değişiminin etanol-dizel yakıt karışımları kullanılarak ve %100 fosil kökenli dizel yakıtı referans alınarak performans ve egzoz emisyon üzerine etkisini incelemiştir. Enjeksiyon zamanlaması ÜÖN'dan uzaklaştırıldıkça ve dizel-etanol yakıt karışımlarındaki etanol oranı attıkça CO ve HC emisyonlarında azalma izlenirken enjeksiyon zamanlamasının ÜÖN'ya yaklaştırılması ile CO ve HC emisyonlarında artış görülmüştür. Enjeksiyon zamanlamasının ÜÖN'ya doğru geciktirilmesi ile tüm yakıt tiplerinde NO<sub>x</sub> emisyonu azalma eğilimi göstermiştir. CO<sub>2</sub> emisyonlarında, püskürtme zamanlamasının

ÜÖN'dan uzaklaştırılması ile ve aynı zamanda dizel-etanol karışımlarındaki etanol yakıt miktarının artmasıyla artış izlenmiştir. Tüm yakıt tipleri için minimum ÖYT değeri orijinal enjeksiyon başlangıç zamanı olan 27° KA ÜÖNÖ'de elde edilmiştir.

He ve ark. [47] bir dizel motorda farklı oranlarda etanol-dizel yakıtları ile karışım hazırlamışlar ve referans yakıt olarak fosil kökenli dizel yakıtını kullanmışlardır. Ayrıca etanol-dizel yakıt karışımlarında faz ayrışımı görüldüğü için yakıt karışımlarının homojenliğini korumak için stabilazör eklemiştir. Karışım yakıtlarındaki etanol oranı arttıkça is, NO<sub>x</sub> ve CO<sub>2</sub> emisyonlarında azalma izlerken CO emisyonunda artış izlemiştir.

Hulwan ve ark., [48] 3 silindirli bir dizel motorda dizel-etanol yakıt karışımlarını kullanmış ve solvent olarak biyodizel yakıtı karışımlara eklenerek motor performans, emisyon ve yanma karakteristikleri üzerine etkisini incelemiştir. Kullandıkları yakıtlar sırasıyla D70/E20/B10 (karışım A), D50/E30/ B20 (karışım B) D50/E40/B10 (karışım C) ve Dizel (FKDY)'dir. Enjeksiyon zamanlamasının orjinal enjeksiyon zamanlamasına göre ÜÖN'dan uzaklaştırılmasıyla silindir gaz basınç değerlerinde artış izlemiştir. 1200 d/d'da enjeksiyon zamanlamasının ÜÖN'dan uzaklaştırılmasıyla ısı dağılım oranında azalma görülürken, dizel yakıt ile karşılaştırıldığında, karışım yakıtları ile elde edilen ısı dağılım oranında artış tespit etmişlerdir. Tüm enjeksiyon zamanlarında fosil kökenli dizel yakıt ile kıyaslandığında, alkol yakıtları ile elde edilen ÖYT değerlerinin yüksek olduğunu görmüşlerdir. Bütün enjeksiyon zamanlarında karışım yakıtları ile izlenen duman ve CO emisyonları dizel yakıt ile elde edilen değerlerden düşük olduğunu görmüşlerdir. Enjeksiyon zamanlamasının erkene alınmasıyla CO<sub>2</sub> emisyonlarında önemli bir değişiklik izlenmezken karışım yakıtları kullanımında CO<sub>2</sub> emisyonlarında FKDY yakıtına göre artış tespit etmişlerdir.

Park ve ark., [49] tek silindirli bir dizel motorda biyoetanol-dizel yakıt karışımlarının (DE10, DE20, DE30) yanma, egzoz emisyon karakteristikleri ile püskürtme ve atomizasyon karakteristikleri üzerine etkisi incelenmiştir. Yapılan çalışmada, yakıt püskürtme başlangıç zamanının ÜÖN'ya yaklaştırılması ile silindir gaz basıncı ve ısı dağılım oranı değerlerinde artış gözlemlenmiştir. Dizel yakıt ile kıyaslandığında,

karışım yakıtları ile elde edilen yanma basıncının ve ısı dağılım oranının tüm enjeksiyon zamanlarında daha düşük olduğu görmüşlerdir.

Xing-cai ve ark., [50] dört silindri bir dizel motorda etanol-dizel yakıt karışımlarını hazırlamış ve karışımlara setan sayısı iyileştirici eklenerek testler yapmışlardır. Dizel yakıtı ile elde edilen silindir gaz basıncı, karışım yakıtları ile elde edilen silindir gaz basınçlarından daha yüksek olarak görmüşlerdir. Karışım yakıtları kendi arasında karşılaştırıldığında karışımdaki setan sayısı iyileştirici oranı artışı ile silindir gaz basıncında artış izlemişlerdir. 3400 d/d ve 0,544MPa ortalama efektif basınç test şartlarında maksimum ısı dağılım oranı setan sayısı iyileştiricisinin eklenmediği karışım yakıtı ile elde edilirken diğer tüm yakıt tiplerinde değerlerin birbirine yakın olduğunu tespit etmişlerdir. ÖYT değerlerinde karışım yakıtlarındaki etanol oranı ile artış gözlemlenmiştir. Dizel yakıtı ile karşılaştırıldığında, karışım yakıtları kullanımı ile NO<sub>x</sub> emisyonlarında azalma tespit etmişlerdir. Setan sayısı iyileştiricisinin karışım yakıtlarındaki oranı arttıkça NO<sub>x</sub> emisyonlarında azalma görmüşlerdir. Dizel yakıtı ile kıyaslandığında, karışım yakıt kullanımı ile is emisyonunda azalma görmüşlerdir.

Yan ve ark., [51] yaptıkları çalışmada farklı oranlarda etanol-dizel yakıt karışımları kullanarak tek silindri bir dizel motorda yanma ve emisyon karakteristiklerini incelemiştir. Karışım yakıtları ile fosil kökenli yakıt kullanımı ile elde edilen silindir gaz basınç değerlerinde önemli bir değişiklik görmemişlerdir. Fosil kökenli dizel yakıt ile kıyaslandığında, karışım yakıtlarındaki etanol oranı arttıkça ısı dağılım oranlarında artış izlemişlerdir. ÖYT değerleri gözlemlenirken, karışım yakıtları kullanımı ile ÖYT değerlerinde artış izlemişlerdir. Karışım yakıtlarındaki etanol oranı arttıkça NO<sub>x</sub> emisyonlarında azalma izlerken HC emisyonlarında önemli oranda artış görülmüştür.

Gawale ve ark., [52] yaptıkları çalışmada homojen dolgu sıkıştırma ateşlemeli (HCCI) bir motorda etanol-dizel, etanol-biyodizel ve dizel yakıt kullanarak yanma karakteristiklerini incelemiştir. Fosil kökenli dizel yakıt ile kıyaslandığında, etanol-dizel ve etanol-biyodizel yakıt karışımları ile elde edilen silindir basınçlarında ve ısı dağılım oranlarında azalma izlemişlerdir. Ayrıca etanol-biyodizel yakıt karışımı kullanımı ile elde edilen ısı dağılım oranı değeri ve silindir basınç değerlerinin etanol-dizel yakıt karışımı kullanımından daha yüksek olduğunu tespit etmişlerdir. % 100 yük

altında, tutuşma gecikme süreleri incelendiğinde etanol-dizel yakıt karışımıyla en uzun süre izlerken en kısa tutuşma gecikme süresi dizel yakıtı kullanımı ile izlemişlerdir. Fosil kökenli dizel yakıt ile kıyaslandığında, etanol-dizel ve etanol-biyodizel yakıt karışımları kullanımında CO ve HC emisyonlarında artış görülürken NO<sub>x</sub> emisyonunda azalma tespit etmişlerdir.

Alptekin, [53] yaptığı çalışmada dizel yakıtı, canola biyodizeli, canola biyodizeli-etanol yakıt karışımı ve canola biyodizeli- solketal yakıt karışımlarının kullanıldığı bir dizel motorda yanma ve emisyon değerlerini incelemiştir. Test yapılan tüm motor devirlerinde minimum ÖYT değeri fosil kökenli dizel yakıtı ile elde etmiştir. Yapılan testlerde canola biyodizeli-etanol karışım yakıtı ve canola biyodizel-solketal karışım yakıtları kullanımında ÖYT değerlerinin %100 canola biyodizeli yakıtı kullanımı ile elde edilen ÖYT değerlerinden yüksek olduğunu görmüştür. Motor devri artışı ile tüm yakıt tiplerinde pilot enjeksiyon başlangıcı ve pilot enjeksiyon sonunun ÜÖN'da uzaklaştığını görmüştür. Pilot enjeksiyon ve ana enjeksiyon püskürtme karakteristikleri uygulanmasıyla 2 tane maksimum silindir gaz basınç noktası elde etmiştir. Birinci maksimum silindir gaz basınç noktasında fosil kökenli dizel yakıt ile daha yüksek değer elde ederken ikinci maksimum silindir gaz basınç noktasında canola biyodizeli, canola biyodizeli-etanol yakıt karışımı ve canola biyodizeli- solketal yakıt karışımlarının kullanımı ile genel olarak dizel yakıt kullanımından daha yüksek değer elde etmiştir. Fosil kökenli dizel yakıt ile kıyaslandığında, canola biyodizeli, canola biyodizeli-etanol yakıt karışımı ve canola biyodizeli- solketal yakıt karışımları ile daha düşük CO ve HC emisyonları izlerken CO<sub>2</sub> ve NO<sub>x</sub> emisyonlarında artış izlemiştir.

Alptekin, [54] yaptığı çalışmada bir dizel motorda fosil kökenli dizel yakıtı, etanol-dizel ve dizel-isopropanol yakıt karışımlarını kullanarak performans, yanma ve enjeksiyon karakteristiklerini incelemiştir. Yapılan testlerde alkol yakıtları ile elde edilen ÖYT değerleri fosil kökenli dizel yakıt ile elde edilen değerlerden daha yüksek olduğunu izlemiştir. Motor devrindeki artış ile pilot enjeksiyon başlangıç zamanının ÜÖN'dan uzaklaştığını görmüştür. Motor devri artışı ile her bir çevrimde pilot enjeksiyon miktarında artış tespit etmiştir. Fosil kökenli dizel yakıtın pilot enjeksiyon miktarı dizel-etanol yakıt karışımının pilot enjeksiyon miktarından düşük iken dizel-isopropanol yakıt karışımından daha yüksek olduğunu izlemiştir. Ana enjeksiyon

süreleri kıyaslandığında, dizel-isopropanol karışım yakıtı kullanımında fosil kökenli dizel yakıtı ve dizel-etanol yakıt karışımıyla daha kısa ana enjeksiyon süresini görmüştür. 1500 d/d'da elde edilen değerler silindir basınçları ve ısı dağılım oranlarını kıyas ettiğinde, karışım yakıtları ile elde ettiği silindir gaz basınç ve ısı dağılım oranı değerlerinin ikinci tepe noktasında dizel yakıttan daha yüksek olduğunu tespit etmiştir. Dizel yakıtına alkol yakıt eklenmesi ile HC, CO<sub>2</sub>,CO ve NO<sub>x</sub> emisyonlarında artış izlemiştir.

Murcak ve ark., [55] çalışmalarında etanol-dizel yakıt karışımlarının tek silindirli bir dizel motorda enjeksiyon zamanlaması değişimiyle motor performans üzerine etkilerini incelemişlerdir. Tüm yakıt tipleri karşılaştırıldığında, maksimum motor gücü 45° KA ÜÖNÖ'de E10 yakıtı ile (%10 etanol-%90 dizel) elde etmişlerdir. Maksimum motor torku E10 yakıtıyla 1400 d/d'da ve 25° KA ÜÖNÖ enjeksiyon zamanlamasında elde edilirken dizel yakıtı ve E5 yakıtı ile 1200 d/d'da ve 35° KA ÜÖNÖ'de elde etmişlerdir.

Rosa ve ark., [56] yaptıkları çalışmada, sıkıştırma ateşlemeli tek silindirli 4 zamanlı bir motorda fosil kökenli dizel yakıtı ve dizel-etanol yakıt karışımları kullanılarak yanma karakteristiklerini incelemişlerdir. Karışım yakıtlarında farklı saflıkta etanol yakıtı kullanmışlardır. Tüm yakıt tipleri ve enjeksiyon zamanlarında maksimum basınç E64W36 (%64 etanol-%36 su) yakıt tipiyle 326° KA'da elde etmişlerdir. Karışımlardaki etanol oranı arttıkça tutuşma gecikmesinin arttığını görmüşlerdir. Referans yakıt ile karşılaştırdıklarında, karışım yakıtlarındaki etanol oranı arttıkça NO<sub>x</sub> emisyonu önemli derecede azalırken CO emisyonunda önemli ölçüde artış izlemişlerdir.

Qi ve ark., [57] yaptıkları çalışmada common rail yakıt enjeksiyon sistemine sahip bir dizel motorda dizel-tung oil-etanol karışımları kullanılarak ve değişik enjeksiyon karakteristikleri uygulayarak performans, emisyon ve yanma karakteristikleri üzerine etkisini incelemişlerdir. Pilot enjeksiyon başlangıç zamanı 0,16 ve 0,48 MPa yük altında pilot enjeksiyon başlangıcı yaklaşık 17° KA ÜÖNÖ ve ana enjeksiyon başlangıç zamanı 0,16 MPa motor yükünde 6,7° KA'da iken 0.48 MPa motor yükünde ana enjeksiyon başlangıç zamanı 7,2° KA ÜÖNÖ'de başlarken 0.80 motor yükünde ana pilot enjeksiyon olmadan ana enjeksiyon başlangıcı 7,4° KA ÜÖNÖ'de



gerçekleşmiştir. Pilot enjeksiyon uygulamasında ÜÖNÖ, silindir basıncında fark edilebilir bir artış görmüşlerdir. 0,16 ve 0,48 MPa motor yükünde karışım yakıtlarıyla elde edilen silindir gaz basınçlarının hafifçe dizel yakıtı ile elde edilen silindir gaz basıncından daha yüksek olduğunu izlemişlerdir. Pilot enjeksiyon uygulaması nedeniyle 0,16 ve 0,48 MPa motor yükünde ısı dağılım oranında tüm yakıt tiplerinde iki tane tepe noktası oluştuğunu tespit etmişlerdir. Birinci tepe noktasında dizel yakıtı ile ısı dağılım oranında daha yüksek değerler elde ederken ikinci tepe noktası değerleri için karışım yakıtları kullanımı ısı dağılım oranlarının arttığını tespit etmişlerdir. Tek enjeksiyon stratejisinde karışım yakıtları kullanımı ısı dağılım oranlarını arttırdığını görmüşlerdir. Düşük motor yüklerinde, karışım yakıtlarının CO emisyon değerleri dizel yakıtının emisyon değerlerinden yüksek olduğu görülürken NO<sub>x</sub> emisyonlarının düşük olduğunu tespit etmişlerdir.

Gao ve ark., [58] yaptıkları çalışmada dört silindirli bir dizel motorda farklı oranda etanol-dizel yakıt karışımları ile farklı enjeksiyon karakteristiklerinin yanma ve emisyonlar üzerine etkisini incelemişlerdir. Ana enjeksiyon stratejisi uygulamasında etanol-dizel yakıt karışımlarındaki etanol oranı arttıkça duman koyuluğunda azalma görmüşlerdir. Maksimum duman koyuluğu %20 etanol - %80 dizel yakıtı ile tespit ederken minimum duman koyuluğu %80 etanol - %20 dizel yakıtı ile elde etmişlerdir. Erken enjeksiyon zamanlaması ile daha yüksek maksimum silindir gaz basıncı ve daha yüksek basınç artış oranı izlerken geç enjeksiyon başlangıç zamanında önemli derecede İMEP (indike ortalama efektif basınç) değerinde azalma izlemişlerdir. Pilot enjeksiyon stratejisi uygulamasıyla elde ederken İMEP değerinin ana enjeksiyon stratejisi ile elde edilen İMEP'den daha yüksek olduğunu tespit etmişlerdir. Maksimum silindir gaz basınç değerleri kıyaslandığında tüm enjeksiyon stratejilerinde yaklaşık aynı değerleri izlemişlerdir. Pilot enjeksiyon ile izlenen maksimum ısı dağılım oranının ana enjeksiyon püskürtme stratejisi ile elde edilen ısı dağılım oranı değerinden daha yüksek olduğunu izlenmişlerdir. Direkt püskürtme uygulamaları ile kıyasladıklarında, pilot enjeksiyon uygulaması sonucu HC ve CO emisyonlarının daha düşük olduğunu tespit ederken NO<sub>x</sub> emisyonlarının daha yüksek olduğunu görmüşlerdir.

Burnete, [59] yaptığı çalışmada dizel-etanol yakıt karışımları kullanılarak pilot enjeksiyon stratejisinin yanma ve emisyon karakteristikleri üzerine etkisini deneysel

ve teorik olarak incelemiştir. Fosil kökenli dizel yakıt ile aynı miktarda etanol-dizel yakıt karışımının pilot enjeksiyonla silindire gönderilmesiyle maksimum silindir gaz basıncında ve CO<sub>2</sub> ile NO emisyonlarında azalma görülürken CO emisyonunda artış görmüşlerdir. Fosil kökenli dizel yakıt ile aynı oranda enerji içeren dizel-etanol yakıt karışımlarının silindire gönderilmesiyle maksimum silindir gaz basıncında artış görülürken CO, CO<sub>2</sub> ve NO emisyonlarında azalma izlemiştir.

Mohammadi ve ark., [60] yaptıkları çalışmada enjeksiyon stratejilerinin etanol-dizel yakıt karışımları kullanarak tek silindirli bir dizel motorda emisyon karakteristikleri üzerine etkisini incelemiştir. Yapılan testlerin sonucunda, tüm yakıt tiplerinde pilot enjeksiyon kullanımı ile silindir gaz basınçlarında artış izlemiştir. Ana enjeksiyon ile kıyaslandığında, pilot enjeksiyon kullanımı ile tüm yakıtlarda CO emisyonlarında azalma izlemiştir. Pilot enjeksiyon ile maksimum CO emisyon değeri ET20 (%20 etanol- %80 dizel) yakıt karışımı ile görürlerken minimum CO emisyon değeri FKDY (%100 dizel) yakıtı ile elde etmişlerdir. Pilot enjeksiyon uygulamasıyla ve karışım yakıtları kullanımı ile toplam yanmamış HC emisyonlarında önemli derecede azalma izlenmesine rağmen pilot enjeksiyon uygulamasında dizel yakıt için toplam HC emisyonlarında fazla bir değişim izlememişlerdir.

Park ve ark., [61] yaptıkları çalışmada etanol-dizel yakıt karışımlarının kullanıldığı dört silindirli common rail yakıt enjeksiyon sistemine sahip bir dizel motorda 2 kademeli yakıt püskürtme stratejisinin egzoz emisyon karakteristikleri üzerine etkisini incelemiştir. Karışım yakıtlarındaki etanol oranı arttıkça genel olarak silindir gaz basıncının ve ısı dağılım oranının azaldığı görülmüştür. Pilot enjeksiyon miktarındaki artış ile önemli oranda silindir gaz basıncında artış görmüşlerdir. Yakıt karışımlarındaki etanol oranı arttıkça NO<sub>x</sub> emisyonlarında azalma tespit etmişlerdir. Tüm yakıtlar için minimum NO<sub>x</sub> emisyon değerleri maksimum enjeksiyon avansında ve maksimum pilot enjeksiyon miktarında elde etmişlerdir. Karışım yakıtlarındaki etanol oranı artışı, enjeksiyon başlangıç zamanının ÜÖN'dan uzaklaştırılması ve pilot enjeksiyon miktarındaki artış ile CO emisyonlarında artış gözlemlemişlerdir. Yanmamış HC emisyonları incelendiğinde etanol oranındaki artışın ve enjeksiyon zamanlamasının erkene alınmasının HC emisyonlarını arttırdığını görmüşlerdir.

Han ve ark., [62] yaptıkları çalışmada içten yanmalı motorlarda kullanım potansiyeli yüksek olan etanolün dizel motorda kullanımını incelemişlerdir. Bu çalışmada etanol emme kanalına püskürtülürken dizel yakıtı silindir içine direkt olarak püskürtmüşlerdir. Yapılan çalışmada, %10 motor yükünde etanol-dizel yakıt karışımlarındaki etanol oranı arttıkça silindir gaz basıncında azalma görürlerken %30, %50 ve %70 motor yüklerinde etanol-dizel yakıt karışımlarındaki etanol oranı arttıkça silindir gaz basınçlarında artış görmüşlerdir. Etanol-dizel yakıt karışımlarındaki etanol oranının artması veya azalmasının değişik motor yüklerinde NO<sub>x</sub> emisyonu üzerine önemli bir etkisi olmadığını belirtmişlerdir. Karışım yakıtındaki etanol oranının artışı ile %30 motor yükünde ısı veriminde artış tespit etmişlerdir.

Jamrozik, [63] yaptığı çalışmada tek silindirli bir dizel motorda etanol-dizel ve metanol-dizel yakıt karışımlarının performans ve emisyon üzerine etkisini incelemişlerdir. Etanol-dizel yakıt karışımlarının kullanımı ile maksimum silindir gaz basıncı %30 etanol - %70 dizel yakıt karışımı ile 61,3 bar olarak elde etmişlerdir. Fosil kökenli dizel yakıt ile karşılaştırdıklarında 5,9 bar'lık bir artış izlemişlerdir. Karışım yakıtları ile maksimum ısı dağılım oranları %20 etanol - %80 dizel ve %20 metanol - %80 dizel yakıtları ile elde etmişlerdir. Karışım yakıtlarındaki alkol yakıt oranı arttıkça oksijen içeriğinde artış izlemişlerdir. Karışım yakıtlarındaki alkol oranı arttıkça NO<sub>x</sub> emisyonunda artış izlerken CO emisyonunda azalma izlemişlerdir.

Aydoğan, [64] yaptığı çalışmada, biyodizel-biyoetanol-dizel yakıt karışımları ve %100 dizel yakıtının kullanıldığı common-rail yakıt enjeksiyon sistemine sahip 4 silindirli dizel motorda performans, emisyon ve yanma karakteristikleri üzerine etkisini incelemiştir. Test sonuçlarında, karışım yakıtları kullanımı ile CO, HC ve motor torkunda azalma izlerken NO<sub>x</sub> emisyonunda ve özgül yakıt tüketiminde artış izlemiştir. Yakıt karışımları ve dizel yakıtı ile elde edilen silindir gaz basınç değerleri ile ısı dağılım oranlarının birbirine yakın olduğunu görmüştür.

Kaiadi ve ark., [65] yaptıkları çalışmada, common-rail yakıt enjeksiyon sistemine sahip bir dizel motorda %100 etanol yakıtı kullanarak tek ve kademeli enjeksiyon stratejilerinin yanma ve emisyon karakteristikleri üzerine etkisini incelemişlerdir. Çalışma sonucunda kademeli enjeksiyon sistemi ile elde edilen sonuçların tek

enjeksiyon uygulamasına göre daha kontrol edilebilir yanma aralığı sağladığı ve daha düşük yanma gürültüsü elde edildiğini bildirmişlerdir.

Li ve ark., [66] yaptıkları çalışmada, sıkıştırma ateşlemeli bir motorda setan sayısı arttırıcı ekli ve eksiz olarak etanol-dizel yakıt karışımları ve %100 fosil kökenli dizel yakıtın kullanılmasının yanma karakteristikleri üzerine etkisini incelemişlerdir. Dizel yakıtı ile karşılaştırdıklarında, etanol-fosil kökenli dizel yakıt karışımlarındaki etanol oranının artması ile silindir gaz basınç değerinde ve ısı dağılım oranında artış görmüşlerdir. Aynı etanol oranına sahip karışım yakıtları karşılaştırıldığında setan sayısı iyileştirici eklenmesi ile silindir gaz basınç değerinde ve ısı dağılım oranında azalma görmüşlerdir. Setan sayısı arttırıcının etanol-fosil kökenli dizel yakıtına eklenmesi ile tutuşma gecikmesi süresinde setan sayısı eklenmemiş etanol-fosil kökenli dizel karışım yakıtlarına oranla azalma tespit etmişlerdir. Setan sayısı arttırıcı kullanılmasıyla etanol-fosil kökenli dizel yakıt karışımlarının yanma gürültüsünde azalma görmüşlerdir.

Sayin ve ark., [67] yaptıkları çalışmada, etanol-dizel yakıtı kullanılan 4 zamanlı tek silindirli direkt enjeksiyonlu bir dizel motorda enjeksiyon başlangıç zamanının değişiminin motor performans ve egzoz emisyonları üzerine etkisini incelemişlerdir. Karışım yakıtlarındaki etanol oranı arttıkça ve enjeksiyon başlangıç zamanı orijinal enjeksiyon zamanına göre ÜÖN'dan uzaklaştırıldıkça  $NO_x$  ve  $CO_2$  emisyonlarında artış görürlerken CO emisyonlarında azalma tespit etmişlerdir. Karışım yakıtlarındaki etanol oranı arttıkça ÖYT değerlerinde kötüleşme görmüşlerdir. Orijinal enjeksiyon başlangıç zamanına göre püskürtme başlangıç zamanının ÜÖN'dan uzaklaştırılmasıyla tüm yakıt tiplerinde ÖYT değerlerinde artış elde etmişlerdir.

Huang ve ark., [68] yaptıkları çalışmada, etanol-fosil kökenli dizel yakıt karışımlarına karışımın %5 oranında n-bütanol ekleyerek ve %100 fosil kökenli dizel yakıtı kullanarak bir dizel motorda performans ve emisyon değerlerini incelemişlerdir. Aynı test şartlarında karışım oranındaki etanol oranı arttıkça ÖYT değerlerinde negatif etki tespit etmişlerdir. Fosil kökenli dizel yakıtı ile karşılaştırıldığında, motorun %50 yükden fazla bir yükte çalıştırılmasıyla karışım yakıtları ile elde edilen CO değerlerinin daha düşük olduğunu görmüşlerdir. Karışım yakıtları kullanımı ile %87'ye kadar duman koyuluğunda azalma tespit etmişlerdir. Etanol-fosil kökenli dizel

yakıt karışımlarında solvent eklenmeden önce karışım yakıtında 2 katman oluşurken karışım yakıtlarına n-bütanol eklenmesiyle en erken 11 güne kadar faz ayrışımı izlememişlerdir.

Literatürde yapılan çalışmalara göstermiştir ki, etanolün fosil kökenli dizel yakıt ile birlikte kullanımındaki en büyük engel, yakıtlar karıştırıldığında meydana gelen faz ayrışımıdır. FKDY-etanol yakıt karışımlarındaki faz ayrışımının engellenmesi için stabilizör olarak bütanolün kullanılması önerilmektedir. Literatürde verilen bilgiler ışığında, bu çalışmada FKDY-etanol yakıt karışımlarındaki faz ayrışımını önlemek için karışım içerisine karışımlardaki etanol oranının %20'si kadar Merck firması tarafından üretilen 2-bütanol ilave edilmiştir. Yapılan gözlemlerde etanol-FKDY karışımlarına eklenen 2-bütanol sayesinde faz ayrışımının önemli derecede engellendiği görülmüştür. Tez çalışmasının Materyal ve Yöntem bölümünde, yakıt karışımlarının hazırlanması ve faz ayrışımının izlenmesi ayrıntılı olarak açıklanmıştır.

Tez çalışmasının hedeflerinden biride farklı enjeksiyon stratejilerinin incelenmesidir. Yapılan çalışmada, enjeksiyon başlangıç zamanlaması değişiminin ve pilot enjeksiyon uygulamalarının motor performans ve yanma özelliklerini üzerine etkisini incelemektir. Elde edilen sonuçlar, orijinal kullanım şartları ile karşılaştırılmıştır.

## 2. ETANOL'ÜN GENEL ÖZELLİKLERİ

### 2.1. Etanol'ün İçten Yanmalı Motorda Kullanımı

Karayolu taşıma araçlarında fosil kökenli yakıtlara ek olarak kullanılan etanol  $C_2H_5OH$  formülü ile gösterilir ve berrak renksiz bir yakıttır. Şekerin fermente edilmesi ile elde edilen etanolün üretiminde kullanılan bazı şeker kaynakları şu şekildedir; mısır, buğday mahsulleri, atık saman, talaş, kanarya otu, kordon otları, yer elması ve sorgum bitkilerini içerir. Etanolü fosil kökenli yakıtla karıştırarak yakıt karışımındaki oksijen miktarı arttırılabilmektedir, böylece silindir içinde daha iyi yanma sağlanır ve kirletici emisyonlar azaltılabilir [31]. Etanol üretiminde kullanılan maddelerin potansiyelleri Tablo 2.1.'de verilmiştir [21].

Tablo 2.1. Kullanılan ham madde potansiyelleri [21]

<b>Hammadde</b>	<b>Biyoetanol üretim potansiyeli (litre/ton)</b>
Şeker kamışı	70
Şeker pancarı	110
Tatlı patates	125
Patates	110
Mısır	360
Pirinç	430
Arpa	250
Buğday	340
Sorgum	60

### 2.2. Dünyada Etanol

Fosil kökenli kaynakların dünya üzerinde rezervlerinin kısıtlı olmasından dolayı etanol gibi yenilenebilir enerji kaynaklarına olan talep her geçen gün artacaktır. Etanol üretimi ve kullanımının ülkelerin dışa bağımlılıklarını azaltması de yakın gelecekteki önemi daha da artacaktır.

Dünyada etanol üretimi son 5 yılda sürekli artışla yaklaşık olarak yılda 26 milyon galondan %12 artışla 29 milyon galona ulaşmıştır. Dünya etanol üretiminin %54'ünü

karşılaman Amerika Birleşik Devletleri 2019 yılında yaklaşık 16 milyon galon etanol üretimiyle açık ara birinci olurken Brezilya 8,6 milyon galon etanol üretimi ile dünya etanol üretiminin %30'unu karşılayarak ikinci sırada yer almıştır. Amerika Birleşik Devletleri ile Brezilya beraber dünya etanol üretiminin %84'ünü karşılamaktadır. Avrupa Birliği ülkelerinde etanol üretimi 2015 yılından 2019 yılına kadar sürekli artış göstermiştir. Enerji ihtiyacı son yıllarda en çok artan ülkelerden olan Çin, dünya etanol üretimini 2019 yılında 900 milyon galon üreterek %3'ünü oluşturmuştur [32]. Tablo 2.2.'de dünya yakıt etanol üretimi verilmiştir.

Tablo 2.2. Dünya yakıt etanol üretimi (Milyon Galon) [32]

Bölge	2015	2016	2017	2018	2019	% Dünya Üretimi
Amerika	14,807	15,413	15,936	16,091	15,776	54
Brezilya	7,200	6,760	6,680	8,010	8,570	30
Avrupa Birliği	1387	1377	1,400	1,430	1,440	5
Çin	813	845	860	1,050	900	3
Kanada	436	436	470	480	500	2
Hindistan	195	275	210	400	530	2
Tayland	334	322	370	390	420	1
Arjantin	211	264	290	290	290	1
Diğer Ülkeler	391	490	414	549	600	2
Toplam	25.770	26.180	26,630	28,690	29,030	

Birçok ülke kendisine biyoyakıt üretmek ve tüketmek için belli hedefler belirlemişlerdir. Bu hedeflere ulaşabilmek için destek paketleri oluşturmuşlardır. Etanol üretimi için kurulacak tesis maliyetlerinin belirli bir kısmı devletler tarafından hibe olarak verilmektedir. Avrupa Birliği 2003 yılında Enerji Ürünleri Yardımı adı altında biyoyakıt kullanımına teşvik olması amacıyla çiftçilere hektar başına 45 Euro vermiştir. Biyoyakıt sektörünün desteklenmesi amacıyla biyoyakıt istasyonlarının satış ve gelir vergilerini düşürmektedir. Etanol tüketiminin artırılması için etanol akaryakıt tüketim vergisinden muaf tutulmaktadır [33].

Brezilya'da etanol kullanımı ilk olarak %5 etanol'ün benzinle karıştırılarak kullanılmasıyla 1931 yılında başlarken son yıllarda etanol karışım oranı fiyatlara bağlı olarak %20-25 arasındadır. Brezilya'da etanol kullanımı için dönüm noktası 2003

yılında esnek yakıtlı otomobillerin (Flexible Fuel Vehicles: FFV) piyasaya sürülmesi sonucu etanol-benzin yakıtı kullanımını gerçekleştirmiştir [34].

Amerika Birleşik Devletlerinde (ABD), 1978 yılında Gasohol adı altındaki program ile araçlarda %10 etanol kullanımı başlamıştır. Ayrıca ABD’de etanolün yakıt olarak araçlarda kullanılmasının desteklenmesi amacıyla etanol ithalatını destekleyen özel gümrük vergisi 31.12.2011 yılına kadar uygulanmıştır [34]. ABD’de istihdamı arttırmak amacıyla 2004 yılındaki istihdam teşvik kanunuyla (American Jobs Creation Act) benzin ile karışım oluşturacak etanol için galon başına 0,5 dolar vergi indirimi sağlamıştır [33].

Çin enerji ihtiyacını karşılamak için sürdürülebilir enerji kaynakları kullanımının artması amacıyla çalışmalar yapmıştır. Çin’de 2007 yılında hazırlanan bir enerji raporunda 2020 yılında toplam enerji ihtiyacının %15’inin yenilenebilir ve biyoyakıtlardan karşılamayı amaçlamıştır [33].

### **2.3. Türkiye’de Etanol**

Türkiye’de ilk defa biyoyakıtlar ile ilgili düzenleme 20.12.2003 yılında 25322 sayılı resmi gazetede yayınlanan 5015 sayılı Petrol Piyasası Kanunu ile biyoyakıtlar akaryakıtta karıştırılabilinecek ürünler arasında yer almıştır. Ayrıca, 22.04.2005 yılında 25794 sayılı Resmi Gazete ’de yayınlanan 2005/8704 sayılı Bakanlar Kurulu Kararı ile yerel tarım ürünlerinden elde edilen etanolün benzinle karıştırılması durumunda maksimum %2 oranında olmak kaydıyla etanolün karışımdaki miktarı kadar Özel Tüketim Vergisi (ÖTV) konusunda muaf tutulmuştur [33].

Ülkemizde dört tane biyoetanol üretim fabrikası bulunmaktadır. Bunlar; Tezkim Tarımsal Kimya San. ve Tic. A.Ş., Tarımsal Kimya Teknolojileri San. ve Tic. A.Ş., Konya Şeker San. ve Tic. A.Ş. Çumra Biyoetanol Tesisi Şubesi, Türkiye Şeker Fabrikaları A.Ş. Eskişehir Şeker Fabrikası’dır [35]. Türkiye’deki etanol üretim miktarı Tablo 2.3.’de verilmiştir.

Türkiye’de etanol üretimi son dört yılda sürekli artış göstermiştir. 2015 yılında 87,019,120 litre olan etanol üretimi 2019 yılında yaklaşık %15’lik bir artış göstererek en yüksek üretim miktarı olan 102,326,216 litreye ulaşmıştır. 2016 yılında etanol



üretimi 93,472,254 litreyken 2017 yılında 96,528,636 litreye ulaşmıştır. 2018 yılında üretilen etanol miktarı bir önceki yıla göre yaklaşık %3'lük bir artışla 99,807,225 litre olmuştur [35].

Tablo 2.3. Türkiye etanol üretimi [35]

Yıllar	2015	2016	2017	2018	2019
Ocak-Şubat-Mart	17,813,664	21,660,056	21,676,741	25,090,843	21,547,438
Nisan-Mayıs-Haziran	22,376,731	24,303,358	24,157,494	23,820,494	25,269,996
Temmuz-Ağustos-Eylül	21,137,448	21,359,292	21,751,805	25,103,810	24,803,175
Ekim-Kasım-Aralık	25,691,277	26,149,548	28,942,596	25,792,078	30,705,607
Toplam Miktar(Litre)	87,019,120	93,472,254	96,528,636	99,807,225	102,326,216

Türkiye İstatistik Kurumu verilerine göre 2019 Mayıs ayı sonu itibarıyla trafikteki araç sayısı 23 milyon 39 bin 551 olurken bu araçların %54,2'ni otomobil grubu, %16,4'ünü kamyonet grubu, %14,2'sini motosiklet grubu, %8,2'sini traktör grubu, %3,7'sini kamyon grubu, %2,1'ini minibüs grubu, %0,9'unu otobüs grubu ve %0,3'ünü özel amaçlı taşıt grubu oluşturmaktadır [36]. 2019 yılındaki araçların akaryakıt tüketim miktarlarına bakıldığında en fazla yakıt talebi 27,052,890 m<sup>3</sup> ile motorin olurken onu 5,990,052 m<sup>3</sup> ile otopaz ve 3,211,969 m<sup>3</sup> ile benzin takip etmiştir. Toplamda 2019 yılında otomotiv yakıtı olarak 36,254,911 m<sup>3</sup> yakıt tüketilmiştir [37].

2019 yılı motorin ve benzin tüketim miktarlarına % 10 ilave etanol eklenilmesi ile yıllık 3,304,294 m<sup>3</sup> toplam benzin ve motorin tasarrufu yapılabilir. Bunun için gerekli olan, yıllık üretim miktarını yaklaşık 33 kat arttırmaktır. Türkiye'de yapılacak tarımı destekleme çalışmalarıyla üretilen etanolün benzin ve motorin ile harmanlanması sonucu kullanılmasıyla fosil kökenli yakıtların kullanım miktarında azalma sağlanarak fosil kökenli yakıtta bağımlılık belli oranda azaltılabilir ve ülkedeki tarımın kalkınmasına katkı bulunarak ithal edilen benzin ve motorin miktarı azaltılabilir.

### **3. MATERYAL VE YÖNTEM**

#### **3.1. Materyal**

Materyal bölümünde, testlerde kullanılan yakıt karışımları, yakıt karışımları için kullanılan ölçüm aletleri, deney düzeneği, deneylerde kullanılan test motoru ve kullanılan ekipmanlar hakkında bilgi verilmiştir.

##### **3.1.1. Test yakıtları**

Tez çalışması için yapılan motor testlerinde kullanılan fosil kökenli dizel yakıtı (FKDY) ulusal bir yakıt istasyonu olan Opet firmasından temin edilmiştir. Bu tez çalışmasında, J.T Baker marka ve %99,9 saflık derecesine sahip olan etanol (C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH) kullanılmıştır. Fosil kökenli dizel yakıtı ile etanol arasında faz ayrışımını engellemek üzere karışımdaki etanol oranının %20'si oranında Merck firması tarafından üretilmiş %99 saflık derecesine sahip olan 2-bütanol eklenmiştir.

##### **3.1.2. Test yakıtlarının hazırlanması ve faz ayrışmasının gözlemlenmesi**

Testlerde üç tip yakıt kullanılmıştır. Birinci yakıt tipi %100 fosil kökenli yakıt olan dizel yakıtı, ikinci kullanılan yakıt hacimsel %5 oranında etanol içeren dizel-etanol karışımı ve üçüncü yakıt hacimsel %10 etanol içeren dizel etanol yakıt karışımıdır.

Testlerde kullanılan fosil kökenli dizel yakıtı FKDY olarak %5 oranında etanol içeren ve %1 oranında 2-bütanol içeren karışımı E5B1 ve %10 oranında etanol ve %2 oranında 2-bütanol içeren karışım yakıtı ise E10B2 olarak isimlendirilmiştir. Etanol-dizel yakıt karışımlarında oluşabilecek faz ayrışımının engellenmesi için yakıt karışımlarındaki etanol oranının %20'si oranında 2-bütanol eklenmiştir. FKDY %100 dizel yakıtı içermektedir. E5B1 yakıtı içeriğinde hacimsel olarak %5 etanol + %1 2-bütanol + %94 FKDY bulunmaktadır. E10B2 yakıt içeriğinde hacimsel olarak %10 etanol + %2 2-bütanol + %88 FKDY içermektedir. Yakıtların içerikleri Tablo 3.1'da verilmiştir.

Tablo 3.1. Yakıt içerikleri tablosu

Test Yakıtı	FKDY, %v/v	Etanol, %v/v	2-Bütanol, %v/v	Alt Isıl Değer [MJ/kg]
Dizel	100	-	-	42,6
E5B1	94	5	1	41,7
E10B2	88	10	2	40,8

Yakıt karışımları hacimsel oranlarla karıştırılarak hazırlanmıştır. Karışım yakıtları oluştururken faz ayrışmasının engellenmesi için FKDY ile 2-Bütanol yakıtı ilk olarak homojen bir karışım elde edilene kadar karıştırılmıştır. FKDY ve 2-Bütanol yakıtlarının yoğunluklarının birbirine yakın olması sebebiyle karışımları ile homojenlik kolay bir şekilde sağlanmıştır. FKDY ve 2-Bütanol yakıtıyla oluşturulan karışım yakıtına daha sonra etanol eklenerek homojenlik sağlanana kadar karıştırılmıştır. Yapılan gözlemlerde yakıt karışımlarında gözle görülebilecek önemli bir faz ayrışmasına rastlanmamıştır. Testlerde kullanılan yakıt özellikleri Tablo 3.2’de verilmiştir.

Tablo 3.2. Yakıt özellikleri\*

Özellikler	FKDY (EN 590)	Etanol (C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> O)	2-Bütanol (C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> O)
Safılık	-	≥ 0.99	≥ 0.99
Yoğunluk (kg/m <sup>3</sup> )	820 – 845	790	805
Viskozite (mm <sup>2</sup> /s, 40°C)	2.0 – 4.5	1.13	3.1
Alt Isıl Değer (MJ/kg)	42.6	26.7	34.4
Kaynama Noktası (°C)	160	78	102
Donma Noktası (°C)	-	-114.5	-115
Parlama Noktası (°C)	≥ 55	12	20,5
Su İçeriği (%)	0,020	≤ 0.2	≤ 0.2
Setan Sayısı	≥ 51	-	-
Kendiliğinden Tutuşma Sıcaklığı (°C)	≈ 210	361	405

\*Yakıt özellikleri üretici firmalardan alınmıştır

Test yakıtlarının hazırlanması için Teknik cam marka 50 ml, 250 ml, 500 ml ve 1 litrelik ölçüm kapasiteli farklı deney tüpleri kullanılmış ve ölçü miktarlarının ayarlanması için 60 ml’lik enjektör kullanılmıştır.

Hazırlanan test yakıtlarının faz ayrışmasını izlemek için tek kullanımlık özel contalı kapaklara sahip cam kavanozlarda hava ile temas etmeyecek şekilde muhafaza

edilmiştir. Ayrıca testlerde kullanılmak üzere hazırlanan yakıt karışımları, 50 litrelik özel bidonlarda muhafaza edilmiştir.

Etanol-dizel yakıt karışımlarına 2-bütanol eklenmeden oluşturulan karışımlar gözlemlendiğinde yaklaşık 20 dakika içinde E5 ve E10 yakıt karışımlarında önemli miktarda faz ayrışımı görülmüştür. Etanol-dizel yakıt karışımlarına, karışım yakıtlarındaki etanol miktarının %20'si oranında 2-bütanol eklendikten sonra E5B1 ve E10B2 yakıt karışımları oluşturulmuş ve 120 saatten fazla yakıtlar izlenmiştir. Karışım yakıtlarında herhangi bir faz ayrışımı görülmemiştir. Karışım yakıtlarına 2-bütanol eklenmiş ve 2-bütanol eklenmemiş görüntüsü Şekil 3.1'de verilmiştir.



Şekil 3.1. Etanol-Dizel yakıt karışımlarına 2-bütanol etkisi

### 3.1.3. Motor test düzeneği

Bu tez çalışmasının motor testleri, Şekil 3.2'de gösterilen motor test düzenğinde gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.2'de gösterilen motor test düzeneği ile emiş havası istenen basınç ve debiye ayarlanabilmektedir. Bununla birlikte motor üzerinde bulunan ortak ray hatlı yüksek basınç direkt enjeksiyon sistemi kontrolcüsü (Elektronik Kontrol Ünitesi-EKÜ) kullanıcıya açık olup kullanıcı tarafından istenen yakıt basıncı, yakıt enjeksiyon süresi (yakıt miktarı) ve yakıt püskürtme başlangıç açısı EKÜ üzerindeki haritalar vasıtası ile kontrol edilebilmektedir. Böylece istenen püskürtme parametreleri anlık olarak denenebilmekte ve ölçüm sonuçları görülebilmektedir.

Yanma ile ilgili hesaplar yapabilmek ve her bir yakıtın yanma karakteristiğinin belirlenmesi için silindir içi gaz basıncın ölçülmesi gerekmektedir. Test motorunda, silindir gaz basıncını ölçmek için AVL marka basınç algılayıcısı yanma odasına yerleştirilmiştir.



Şekil 3.2. Motor test düzeneği

Deneylerde tek silindirli, common rail yakıt püskürtme sistemine sahip, 4 zamanlı süperşarjlı ve su soğutmalı John Deere marka içten yanmalı bir dizel motor kullanılmıştır. Kullanılan test motorunun teknik özellikleri Tabloda 3.3’de verilmiştir. Tek silindirli motorun bileşenleri, yakıt sistemi ve motor kontrol ünitesinden oluşmaktadır. Tek silindirli motorun bağlı bulunduğu motor test düzeneği üzerinde yağ şartlandırma ve soğutma devresi şartlandırma sistemleri bulunurken, yakıt şartlandırma ve emiş havası şartlandırma üniteleri de motor test düzeneği odasının diğer bileşenlerini oluşturmaktadır. Motor test düzeneği ve çevre bileşenleri ile motor sistemleri tam kontrol altında çalıştırılabilmektedir.

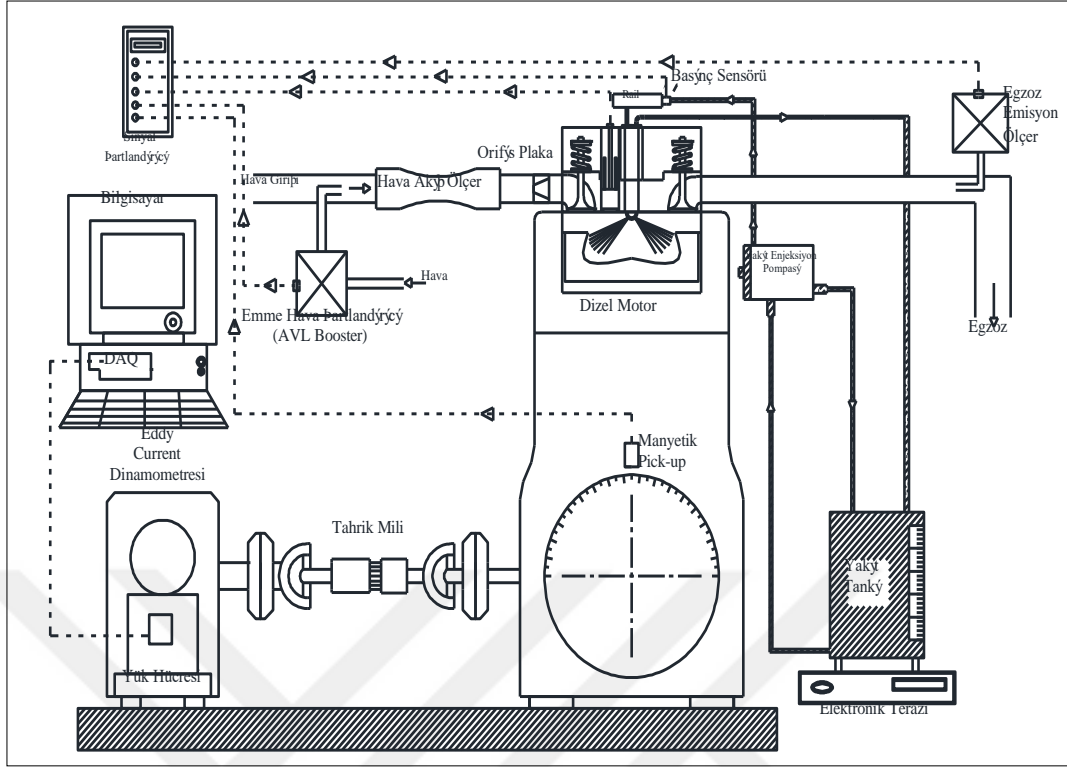
Tablo 3.3. Tek silindirli deney motorun özellikleri

Motor	Tek Silindirli Araştırma Motoru
Tipi	4 Zamanlı
Soğutma şekli	Su soğutmalı
Enjeksiyon tipi	Direkt Enjeksiyonlu – 1800 bar
Silindir hacmi	1120 cm <sup>3</sup>
Supap sayısı	4
Maksimum silindir içi basınç	190 bar
Maksimum motor hızı	2500 d/d
Maksimum güç	50 kW
Maksimum tork	160 Nm
Bore	106.5 mm
Stroke	127 mm
Sıkıştırma Oranı	16.4

Motor testleri sırasında her bir ölçüm parametresi için hesaplanan hata analizi Tablo 3.4’de verilmiştir. Motor test düzeneğinde motorun yüklenmesi için AVL marka compact testbed eddy-current dinamometre kullanılmıştır. Kullanılan eddy-current dinamometresi devir ölçüm aralığı 0-8000 d/d ve tork ölçüm aralığı 0-190 Nm’dir. Deney düzeneğinin şematik görünümü Şekil 3.3’de verilmiştir.

Tablo 3.4. Hata analiz değerleri

Ölçüm	Cihaz	Doğruluk
Tork	HBM Torque Flange	±%0.1
Motor Devri	AVL Encoder	≤±0.1CA
Hücre Nem Testi	Vaisala – HMT 330	±%1% RH
Hücre Sıcaklık Testi	Vaisala – HMT 330	±0.2°C
Hava Akışı	AVL Flowsonix	<±%0.25
Silindir Gaz Basınç Sensörü	GU22C	0.05CA
Enjeksiyon Zamanlaması	Angle Encoder	±0.1CA
Supercharger – Boost Air Temperature	AVL 515X	±5°C
Supercharger – Boost Air Pressure	AVL 515X	±10mbar
Motor Soğutma ve Yağ Şartlandırıcı	AVL-577	±1K
Yakıt Tüketimi	AVL-735	<0.15%
Blow-by	AVL 442	±% 1.5
NO <sub>x</sub>	Chemiluminescence Detector	≤±%1
CO <sub>2</sub>	Non-Dispersive Infrared Rays	≤±%0.5
Sıcaklık Sensörleri	PT100 (K Type)	≤±%1



Şekil 3.3. Deney düzeneği şematik görünümü

Deneylerde AVL marka yakıt kütle akış ölçer kullanılmıştır. Kullanılan yakıt kütle akış ölçer ISO 9001'e göre doğruluk kontrolü özelliğine sahiptir ve 125 kg/sa maksimum yakıt tüketimine kadar ölçüm yapabilmektedir. Kullanılan yakıt kütle akış ölçerin teknik özellikleri Tablo 3.5'de verilmiştir.

Tablo 3.5. Yakıt kütle akış ölçer teknik özellikleri\*

Ölçüm Aralığı	0-125 kg/sa
Maksimum Ölçüm Frekansı	20 Hz
Ortam Sıcaklığı	0 ... 50 °C
Yakıt Besleme Basıncı	0.1 ... 0.8 bar
Yakıt Besleme Akışı	maksimum tüketim + 20 kg/h
Yakıt Besleme Sıcaklığı	- 10 / 40 °C
Yakıtlar	Benzin (EN228), Dizel (EN590), %30'a kadar biyodizel (EN14214) ve %20 oranında metanol/etanol. Esnek Yakıt tipi ile %100'e kadar metanol, etanol ve biyodizel.

Testlerde emme hava kütle ölçer olarak AVL Flowsonix cihazı kullanılmıştır. Ölçüm sonuçları kg/sa biriminden alınmıştır. Hava kütle ölçer cihazı ile 1 kHz'e kadar veri

hızlarına sahip ölçüm verileri analog çıkış üzerinden kullanılabilir. Hava kütle ölçerinin teknik özellikleri Tablo 3.6'da verilmiştir.

Tablo 3.6. Hava kütle ölçer teknik özellikleri\*

Ölçüm Aralığı	0 - 1400kg/sa
Tepki Süresi	$T_{90} = <10\text{ms}$
Hava Sıcaklığı	-20 / 80°C
Ölçüm Başlığı Ortam Sıcaklığı	-20 / 60°C
Maksimum Çalışma Basıncı	2,5 bar
Güç Tüketimi	25 Watt

Silindir gaz basınç değerlerinin ölçümünde AVL marka GU22C basınç ölçüm cihazı kullanılmıştır. Kullanılan basınç ölçüm cihazının özellikleri Tablo 3.7'de verilmiştir.

Tablo 3.7. Basınç ölçüm cihazı teknik özellikleri\*

Ölçüm Aralığı	0 / 250 bar
Doğal Frekans	100 kHz
Sensör Çalışma Sıcaklığı Aralığı	-40 / 400 °C
Ağırlık	12,5 gram
Lineerlik	$\leq \pm 0,3$
İvmelenme Hassasiyeti	$\leq 0,001$ bar/gram

Yapılan deneylerde Supercharger olarak AVL marka 515X cihazı kullanılmıştır. Kullanılan Supercharger'ın teknik özellikleri Tablo 3.8'de verilmiştir.

Tablo 3.8. Supercharger teknik özellikleri\*

Sıcaklık Kontrol Aralığı	30 / 130 °C
Doğruluk	$\pm 5$ °C
Basınç Kontrol Aralığı	200 / 400 mbar
Doğruluk	$\pm 10$ mbar
Maksimum Hava Hacmi	Tasarıma Bağlı

\*Deneylerde kullanılan cihazların özellikleri üretici firmadan alınmıştır.



## 3.2. Motor Testleri

### 3.2.1. Testlerin yapılışı ve test şartları

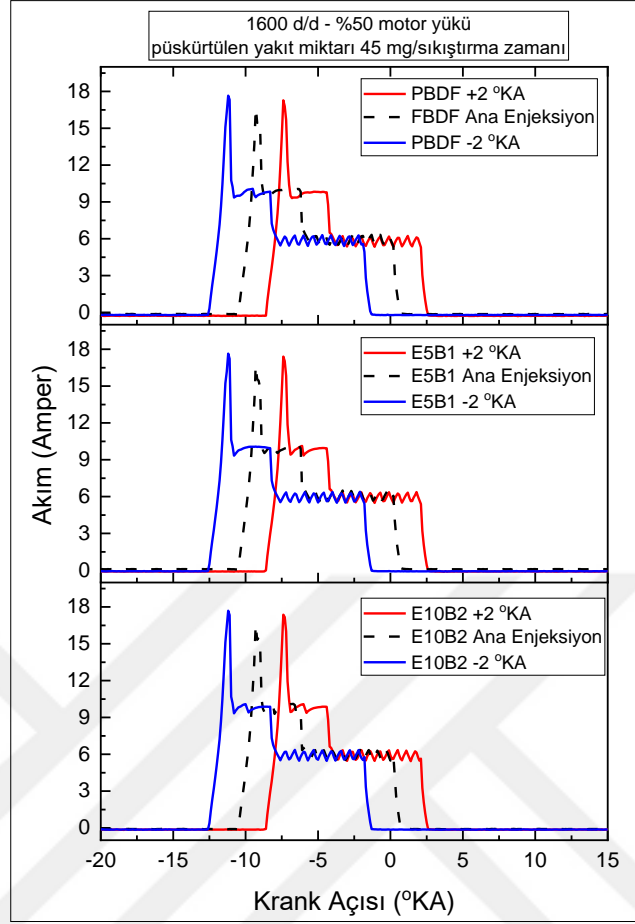
Motor testleri gerçekleştirilirken ISO 8178’de tanımlanan test ortamı ve ölçüm yöntemleri gözetilerek, ISO 14396’da tarif edildiği şekilde güç ölçümü yapılmıştır.

Deneylerde, ilk olarak motorun kararlı hale getirilmesi için motor yağ sıcaklığı 90°C’ye gelene kadar FKDY ile çalıştırılmıştır. Yapılan testler boyunca emme hava basıncı 240 milibar, emme hava sıcaklığı 25°C, yakıt sıcaklığı 20°C, yağ sıcaklığı 90°C, soğutma suyu sıcaklığı 70°C’de sabit tutulmuştur. Yapılan çalışmada datalar 0,1°KA’da toplanmıştır ve toplam çevrimin sayısının ortalaması alınmıştır. Test şartlarını gösteren bilgiler Tablo 3.9’da verilmiştir.

Tablo 3.9. Test şartları tablosu

Giriş Parametreleri	Birim	Değer
Motor Devri	d/d	1600
Yakıt Karışımları	Vol.	FKDY E5B1 E10B2
Motor Yüğü	%	50
Motor Soğutma Sıcaklığı	°C	70
Motor Yağ Sıcaklığı	°C	90
Emme Hava Basıncı	kPa	24
Hava Sıcaklığı	°C	25
Toplam Püskürtülen Yakıt	mg/stroke	45
%5 Pilot Enjeksiyon ile Yakıt Miktarı	mg/stroke	2,25 / 42,25
%10 Pilot Enjeksiyon ile Yakıt Miktarı	mg/stroke	4,5 / 40,5
Ana Enjeksiyon	°KA ÜÖNÖ	10,4
Enjeksiyon Zaman Değişimi	°KA ÜÖNÖ	± 2

Deneylerde FKDY, E5B1 ve E10B2 yakıtları sırasıyla kullanılmıştır. Enjeksiyon zamanlamasının etkisinin incelenmesi için her bir yakıt için ilk olarak standart ana enjeksiyon zamanlaması 10,4° KA üst ölü noktadan önce (ÜÖNÖ) yakıtlar püskürtüldü ve sonra enjeksiyon başlangıç zamanlaması ±2° KA püskürtme zamanlaması değiştirilerek testler yapılmıştır. Herbir yakıt için yapılan püskürtme miktarı değişimi Şekil 3.4’de verilmiştir.



Şekil 3.4. Püskürtme başlangıç zamanlaması değişiminin gösterimi

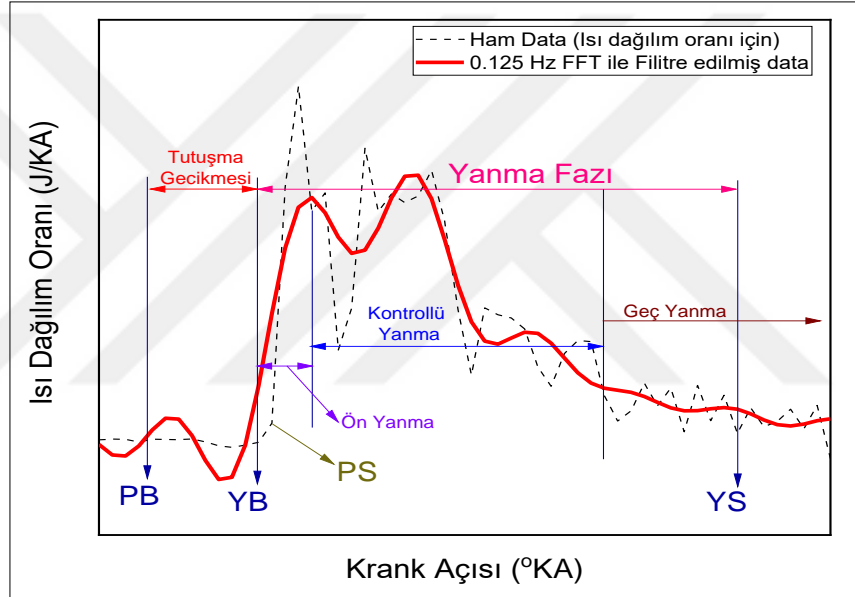
Deneylerde, enjeksiyon miktarının etkisinin incelenmesi için ana enjeksiyon başlangıç zamanı olan  $10,4^{\circ}$  KA ÜÖNÖ'de yakıtlar silindir içine kademeli olarak püskürtülmüştür. Testlerde FKDY, E5B1 ve E10B2 yakıtları sırasıyla kullanılmıştır. Yapılan testlerde ilk olarak yakıtlar ana enjeksiyonla, sonra %5 pilot ve %10 pilot enjeksiyonlarla püskürtülerek gerçekleştirilmiştir. Çalışma sonucunda, test verileri püskürtme miktarı ve yakıt tipine göre ana püskürtme miktarı ve fosil kökenli dizel yakıtı referans alınarak özgül yakıt tüketimi (ÖYT), silindir içi gaz basıncı, ısı dağılım oranı, CO, CO<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub> ve NO<sub>x</sub> emisyonları kıyas edilmiştir.

### 3.3. Yöntem

Tez çalışmasının bu bölümünde, yapılan çalışmalar sonucu elde edilen veriler kullanılarak yapılan hesaplamalar hakkında bilgi verilmiştir.

### 3.3.1. Yanma fazlarının hesaplanması

İçten yanmalı motorlarda, silindir içindeki yanma süreci bölümlere ayrılabilir [69]. Birinci bölge tutuşma gecikmesi ( $\theta_{TG}$ ) olarak adlandırılan enjeksiyon başlangıcı ile yanma başlangıcı arasındaki zaman ( $\theta_{PB} - \theta_{PS}$ ) olarak ifade edilir. İkinci bölge, yanma fazı ( $\theta_{YF}$ ) olan yanma başlangıcı ( $\theta_{YB}$ ) ile yanma sonu arasındaki ( $\theta_{YS}$ ) zaman ( $\theta_{YF} = \theta_{YB} - \theta_{YS}$ ) olarak gösterilir. Burada yanma sonu, yakıt kütle kesrinin %90'nın yandığı andaki krank açısı (KA90) olarak kabul edilmiştir. Üçüncü bölge olarak yakıtın %90'nın yandığı andan sonra kalan bölgedir. Yanma fazları Şekil 3.5'de verilmiştir. Ayrıca PS püskürtme sonunu ifade etmektedir.



Şekil 3.5. Yanma fazları

Yanma fazlarının tahmini için genel olarak Wiebe fonksiyonu kullanılmaktadır.

$$x_b = \frac{m_b}{m_f} = 1 - \exp \left[ -a \left( \frac{\theta - \theta_{YB}}{\Delta\theta_{YF}} \right)^{m+1} \right] \quad (3.1)$$

Eşitlik 3.1'de verilen formülde,  $\theta_{YB}$  yanma başlangıcındaki krank mili açısını ve  $\theta$  anlık krank mili açısını ifade ederken  $\Delta\theta_{YF}$  ( $\theta_{YS} - \theta_{YB}$ ) yanma süresini ifade etmektedir. Eşitlik 3.1, 2 parametre tarafından kalibre edilmektedir. Bunlar: m oluşum faktörü ve a verim faktörünü göstermektedir.  $x_b$  yanmış kütle kesrini ifade ederken  $m_b$  silindir içindeki yanmış kütle ve  $m_f$  silindir içindeki yakıtı ifade etmektedir. Bu

çalışmada, AVL Concerto yazılımı kullanılarak IDO, YB ve YF gibi yanma parametreleri hesaplanmıştır.

### 3.3.2. Isı dağılımının termodinamik modellemesi

Klasik Birinci Kanun denklemi artan krank mili açısına bağlı olarak aşağıdaki gibi yazılabilir;

$$dQ_{hr} = dW + dU_s + dQ_w \quad (3.2)$$

Eşitlik 3.2’de;

$dQ_{hr}$  : yanma sonucu açığa çıkan ısı enerjisi

$dW$  : piston hareketinden dolayı kaynaklanan iş

$dU_s$  : iç enerjideki değişim

$dQ_w$  : silindir duvarından kaynaklan ısı kaybı

ifade etmektedir.

Eşitlik 3.2’de kütle değişimleri ihmal edilmiştir. Diğer formülasyonlar aşağıdaki gibi yazılabilir;

$$dW = p. dV \quad (3.3)$$

$$dU_s = m. \bar{c}_v. dT \quad (3.4)$$

$$dT = \frac{d(p.V)}{m.R} \quad (3.5)$$

$$\gamma - 1 = \frac{R}{C_v} \quad (3.6)$$

$$\dot{Q}_w = h_g. S_w. (T - T_w) \quad (3.7)$$

Burada;

$p$  : silindir gaz basıncı

$dV$  : silindir hacmindeki değişim

$m$  : sıkıştırılmış kütle

$\bar{c}_v$  : sabit hacimde ortalama özgül ısı

$R$  : özgül gaz sabiti

$\gamma$  : belirli ısıların oranı

$S_w$  : silindir duvar yüzeyi

$h_g$  : ısı değişim katsayısı

$T$  : silindir gaz sıcaklığı

$T_w$  : silindir duvar sıcaklığı

ifade etmektedir.

Duvar sıcaklığı sabit ve üniform kabul edilir. Eşitlik 3.8'deki ısı transfer katsayısını tahmin etmek için Eichelberg'in korelasyonu [70] kullanılmıştır.

$$h_g = 10.2 S_w p^{0.5} T^{0.5} \quad (3.8)$$

4.3 – 4.7 arasındaki denklemler, denklem 3.2'de yerine koyulduğunda, birinci kanun ısı yayılım denklemini Eşitlik 3.9'daki gibi yazılabilir;

$$dQ_{hr} = \frac{\bar{\gamma}}{\bar{\gamma}-1} \cdot p \cdot dV + \frac{1}{\bar{\gamma}-1} \cdot V \cdot dp + h_g \cdot S_w \cdot (T - T_w) \quad (3.9)$$

Eşitlik 4.9'da, belirli bir gaz sabiti olan  $R$ 'nin sabit olduğu, özgül ısı ve gama için ortalama değerlerin alındığı ve sıvı yakıt entalpisinin ihmal edildiği bir yaklaşım olduğu kabul edilmiştir. Kümülatif ısı oranı ( $Q_{hr}$ ), yanma başlangıcından (YB) tahmin edilen yanma sonuna (TEYS) kadar olan krank açısı aralığı üzerinden denklem 3.9 kullanılarak hesaplanabilir [71]. Bu hesaplama Eşitlik 3.10'da verilmiştir.

$$Q_{hr} = \sum_{i=YB}^{TEYS} dQ_{hr,i} \quad (3.10)$$

Bu çalışmada elde edilen değerler denklem 3.9'da kullanılarak ısı dağılım oranı eğrisi elde edilmiştir.

## 4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu bölümde aynı şartlar altında %5 + %1 (E5B1) ve %10 + %2 (E10B2) hacimsel 2-bütanol-etanol-dizel yakıt karışımlarının kullanıldığı sıkıştırma ateşlemeli motorda farklı enjeksiyon zamanlarında ve farklı pilot enjeksiyon oranlarında elde edilen fren özgül yakıt tüketimi, ısı dağılım oranı, silindir gaz basıncı ve CO, CO<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub> ve NO<sub>x</sub> emisyon değerleri fosil kökenli dizel yakıtı (FKDY) ile alınan sonuçlarla kıyas edilmiştir.

### 4.1. Farklı Enjeksiyon Başlangıç Zamanlarının Etkileri

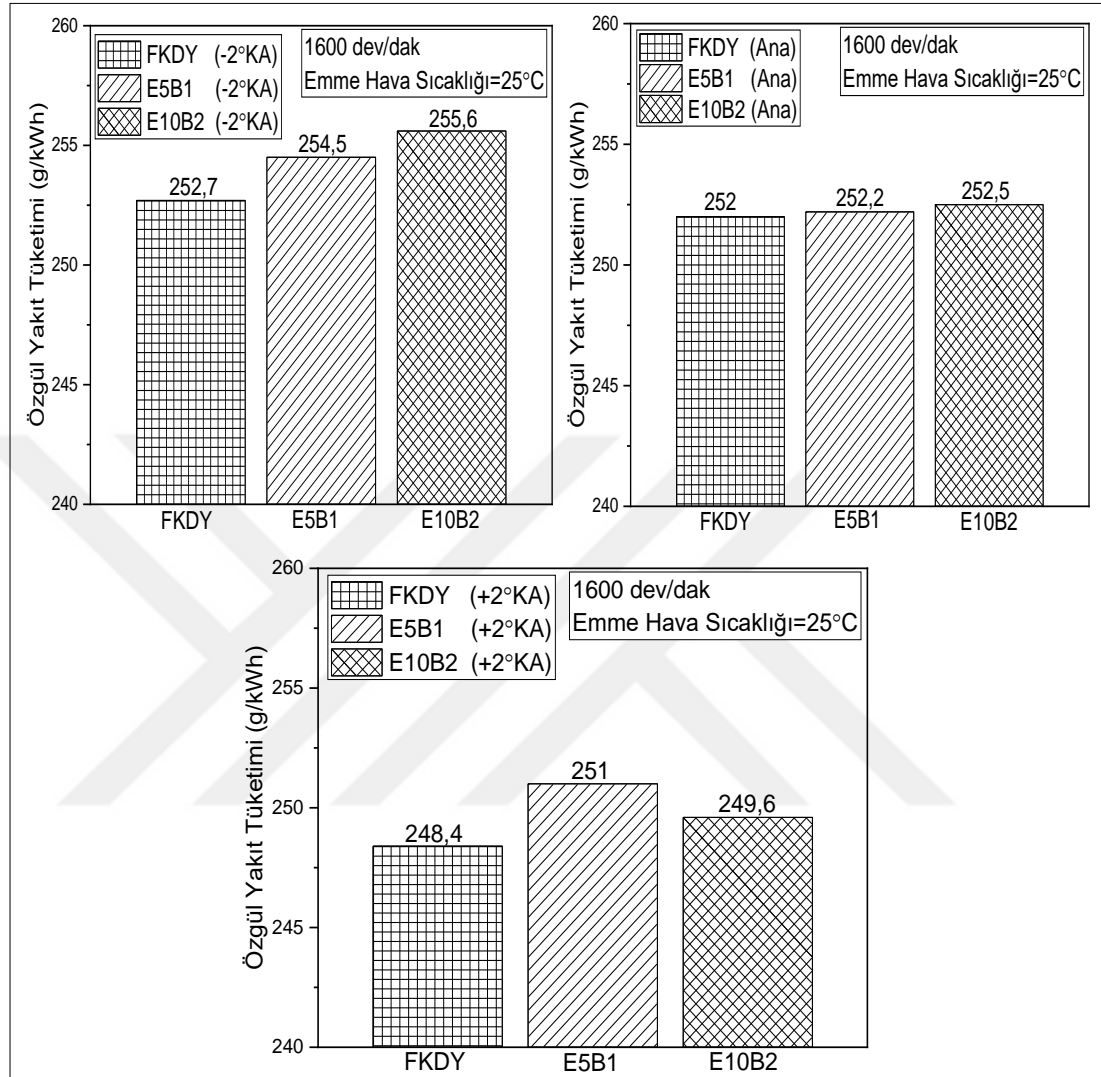
#### 4.1.1. Fren özgül yakıt tüketimi

Her şeyden önce bu çalışmada her bir test için püskürtülen yakıt miktarları aynıdır. Yakıtların ve yakıt karışımlarına ilave edilen etanol miktarı değiştikçe yakıtın sağladığı enerji miktarı değişim göstermiştir. Bunun bir sonucu olarak her bir testte motorun döndürme momenti ve gücü çok az da olsa değişim göstermiştir. Sonuç olarak ÖYT değerlerinde çok önemli farklar görülmemiştir. Püskürtülen yakıt miktarı her bir yakıt için 45 mg/stroke'dur.

Şekil 4.1'de görüldüğü üzere enjeksiyon zamanlamasının değişimini FKDY, E5B1 ve E10B2 yakıtları kullanılarak özgül yakıt tüketimi (ÖYT) üzerine etkisi incelenmiştir. Ana enjeksiyon başlangıç zamanında minimum özgül yakıt tüketimi FKDY ile 252 g/kWh olarak elde edilirken aynı enjeksiyon başlangıç zamanında maksimum ÖYT değeri E10B2 yakıtı ile 252,5 g/kWh olarak elde edilmiştir. E5B1 yakıtı için ana enjeksiyon başlangıç zamanında ÖYT değeri 252,2 g/kWh olarak tespit edilmiştir.

Tüm yakıtlar için maksimum ÖYT değerleri klasik enjeksiyon zamanlamasına göre, enjeksiyon zamanlamasının ÜÖN'ya 2° KA yaklaştırılması ile FKDY için 252,7 g/kWh, E5B1 yakıtı için 254,5 g/kWh ve E10B2 yakıtı için 255,6 g/kWh olarak elde edilmiştir. Tüm yakıtlar için minimum ÖYT değerleri ana enjeksiyon zamanlamasına göre, enjeksiyon zamanlamasının ÜÖN'dan 2° KA uzaklaştırılmasıyla E5B1 yakıtı ile

251 g/kWh olarak tespit edilirken E10B2 yakıtı için 249,6 g/kWh ve FKDY için 248,4 g/kWh olarak elde edilmiştir.



Şekil 4.1. Enjeksiyon başlangıç zamanının özgül yakıt tüketimi üzerine etkisi

Fren özgül yakıt tüketimi, motorun birim zamanda bir kW güç üretmesi için gerekli yakıt miktarıdır. Alt ısıl değer yakıtın yanması sonucu hidrojen karbon bağları arasındaki bağların kopması sonucu oluşan minimum enerji miktarıdır. Alt ısıl değer, ÖYT değerlerini etkileyen en önemli parametrelerden biri yakıtların sahip olduğu alt ısıl değerdir. Karışım yakıtları ile elde edilen ÖYT değerlerinin fosil kökenli dizel yakıt ile elde edilen ÖYT değerlerinden daha yüksek görülmesinin sebebi alkol yakıtlarının sahip olduğu alt ısıl değerinin daha düşük olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Enjeksiyon zamanlaması kıyaslandığında, yakıt püskürtme başlangıç zamanı ÜÖN'dan uzaklaştırıldığında ÖYT değerlerinde azalma görülürken

ÜÖN'ya yaklaştırıldığında artış izlenmiştir. Bunun sebebi enjeksiyon başlangıç zamanı ÜÖN'dan uzaklaştırıldığında yakıtın yanması için yeterli zaman elde edilip silindir içinde daha iyi bir yanma gerçekleşmesinden dolayı ÖYT değerlerinde azalma olduğu düşünülmektedir.

#### **4.1.2. Isı dağılım oranı**

Şekil 4.2'de E5B1, E10B2 ve FKDY yakıtları kullanılarak farklı yakıt püskürtme zamanlamalarında (-2°KA, klasik, +2°KA) ısı dağılım oranı üzerine etkisi gösterilmiştir. Yapılan testlerde maksimum ısı dağılım oranı E10B2 yakıtı ile ana enjeksiyon başlangıç zamanında 218 joule (J) olarak elde edilirken minimum ısı dağılım oranı FKDY ile 12,4° KA ÜÖNÖ'de 99 J tespit edilmiştir. Tüm yakıtlar için minimum ısı dağılım oranı enjeksiyon başlangıç zamanının ana enjeksiyon başlangıç zamanına göre 2° KA ÜÖN'dan uzaklaştırılması sonucu FKDY ile 99 J, E5B1 yakıtı ile 123,4 J ve E10B2 yakıtı ile 163 J olarak elde edilmiştir.

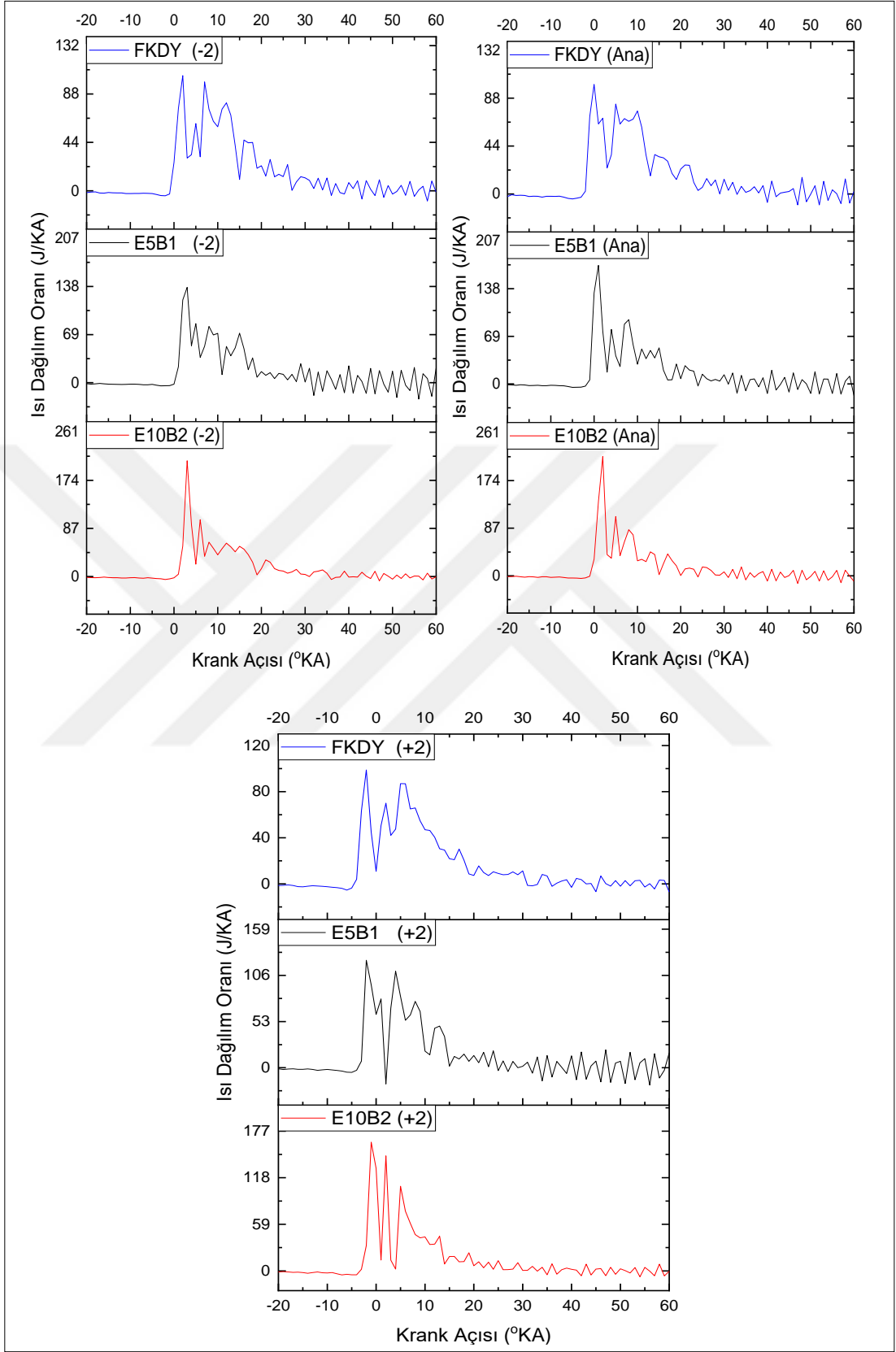
8,4° KA ÜÖNÖ'de yakıtların püskürtülmesi ile FKDY için ısı dağılım oranı 104,8 J olarak elde edilirken E5B1 (136,8 J) yakıtı kullanımı ile yaklaşık %36 ve E10B2 (209,2 J) yakıtı kullanımı ile yaklaşık % 100 oranda artış görülmüştür. Ana enjeksiyon başlangıç zamanında maksimum ısı dağılım oranı E10B2 yakıtı ile 218 J olarak elde edilirken E5B1 yakıtı ile 171,8 J ve FKDY ile 100,6 J olarak tespit edilmiştir.

Isı dağılım oranı, yanma zamanı boyunca her bir krank mili açısında silindir içeresine salınan enerji miktarıdır. Alkol yakıtların sahip oldukları yüksek buharlaşma ısısı ve düşük setan sayıları karışım yakıtlarının buharlaşma ısısını yükseltirken ve setan sayısını düşürmektedir. Düşük setan sayısına ve yüksek buharlaşma ısısına sahip olan karışım yakıtları silindir içinde daha uzun tutuşma gecikmelerine sebep olmaktadır. Daha uzun tutuşma gecikmeleri daha yüksek ısı dağılım oranlarının elde edilmesine sebep olduğu düşünülmektedir.

#### **4.1.3. Silindir gaz basıncı**

Şekil 4.3'de görüldüğü üzere bütün enjeksiyon zamanlarında etanol-dizel yakıt karışımlarının (E5B1, E10B2), silindir içi gaz basınç değerleri dizel yakıtı (FKDY)





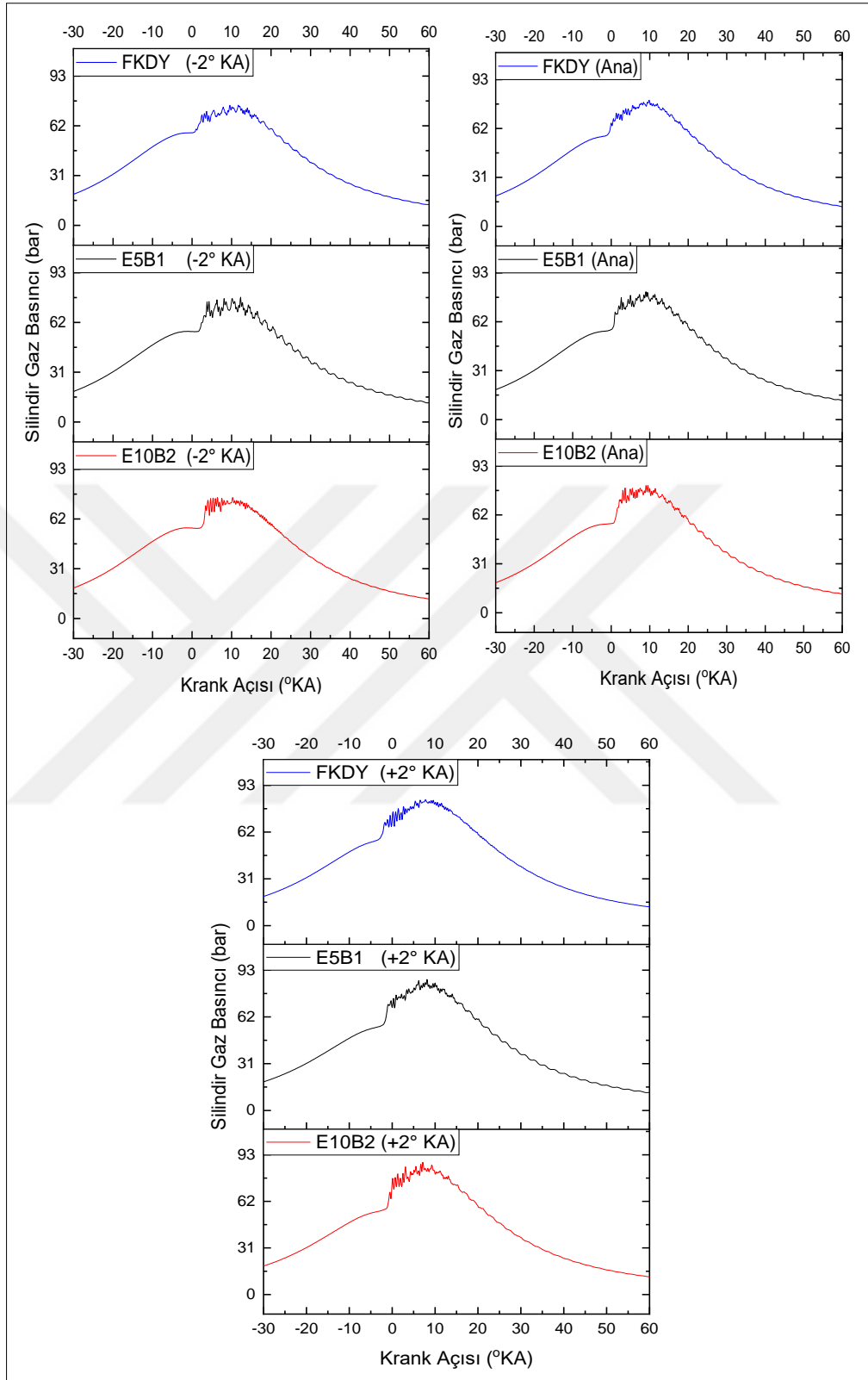
Şekil 4.2. Enjeksiyon başlangıç zamanının ısı dağılım oranı üzerine etkisi

göre daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Maksimum silindir gaz basıncı E10B2(88 bar) yakıtıyla 12,4° KA ÜÖNÖ'deki püskürtme başlangıç zamanında, FKDY(83,4 bar) yakıtına göre yaklaşık %5 oranında artış gözlemlenmiştir. E5B1 yakıtıyla maksimum silindir gaz basıncı püskürtme başlangıç zamanının klasik enjeksiyon başlangıç zamanına göre 2° KA ÜÖN'dan uzaklaştırılmasıyla (12,4° KA ÜÖNÖ) 86,8 bar olarak tespit edilmiştir.

Klasik (ana) enjeksiyon başlangıç zamanında (10,4° KA ÜÖNÖ) karışım yakıtları kullanılarak elde edilen silindir gaz basınç değerleri E5B1 yakıtı için 81 bar ve E10B2 yakıtı için 80,6 bar iken FKDY yakıtı için 80 bar olarak elde edilmiştir. Enjeksiyon başlangıç zamanlaması, klasik enjeksiyon başlangıç zamanına göre 2° KA ÜÖN'ya yaklaştırılmasıyla (8,4° KA ÜÖNÖ) E5B1, E10B2 ve FKDY yakıtları püskürtüldüğünde silindir gaz basınçları azalma eğilimi göstermiştir. Yakıtlar 8,4° KA ÜÖNÖ'de püskürtüldüğünde E5 yakıtı 77,7 bar, E10 yakıtı 75,3 bar ve FKDY için 74,7 bar olarak elde edilirken bu değerler klasik püskürtme başlangıç zamanında elde edilen silindir gaz basınç değerlerinden E5B1 yakıt için 3,3 bar, E10B2 yakıtı için 5,3 bar ve FKDY yakıtı için yaklaşık 5,3 bar düşük olduğu görülmüştür. Minimum silindir gaz basıncı, püskürtme başlangıç zamanı 8,4 KA ÜÖNÖ'de FKDY kullanımında 74,7 bar olarak görülmüştür.

Kullanılan yakıtların viskozitesi, yoğunluğu, sıkıştırılabilirliği gibi özellikleri silindir içi yanma değerleri üzerine etkisi vardır. Karışım yakıtları ile elde edilen silindir basınç değerleri fosil kökenli dizel yakıt ile elde edilen değerlerden yüksek olmasının sebebi, alkol yakıtların sahip oldukları oksijen miktarından dolayı silindir içi yanmayı iyileştirerek hızlı bir yanma sağladığı düşünülmektedir. Böylece karışım yakıtları ile daha yüksek silindir gaz basınç değerleri elde edildiği düşünülmektedir.

Enjeksiyon zamanlamaları kıyaslandığında, enjeksiyon zamanlamasının erkene alınması ile silindir gaz basınçlarının daha yüksek elde edilmesinin sebebi ÜÖNÖ daha fazla yakıtın yanmış olmasıdır. Enjeksiyon başlangıç zamanının geciktirilmesiyle daha fazla yakıt ÜÖN'dan sonra yanacağından silindir gaz basınç değerlerinin daha düşük olduğu düşünülmektedir.



Şekil 4.3. Enjeksiyon başlangıç zamanının silindir gaz basıncı üzerine etkisi

#### 4.1.4. Karbonmonoksit (CO) emisyonu

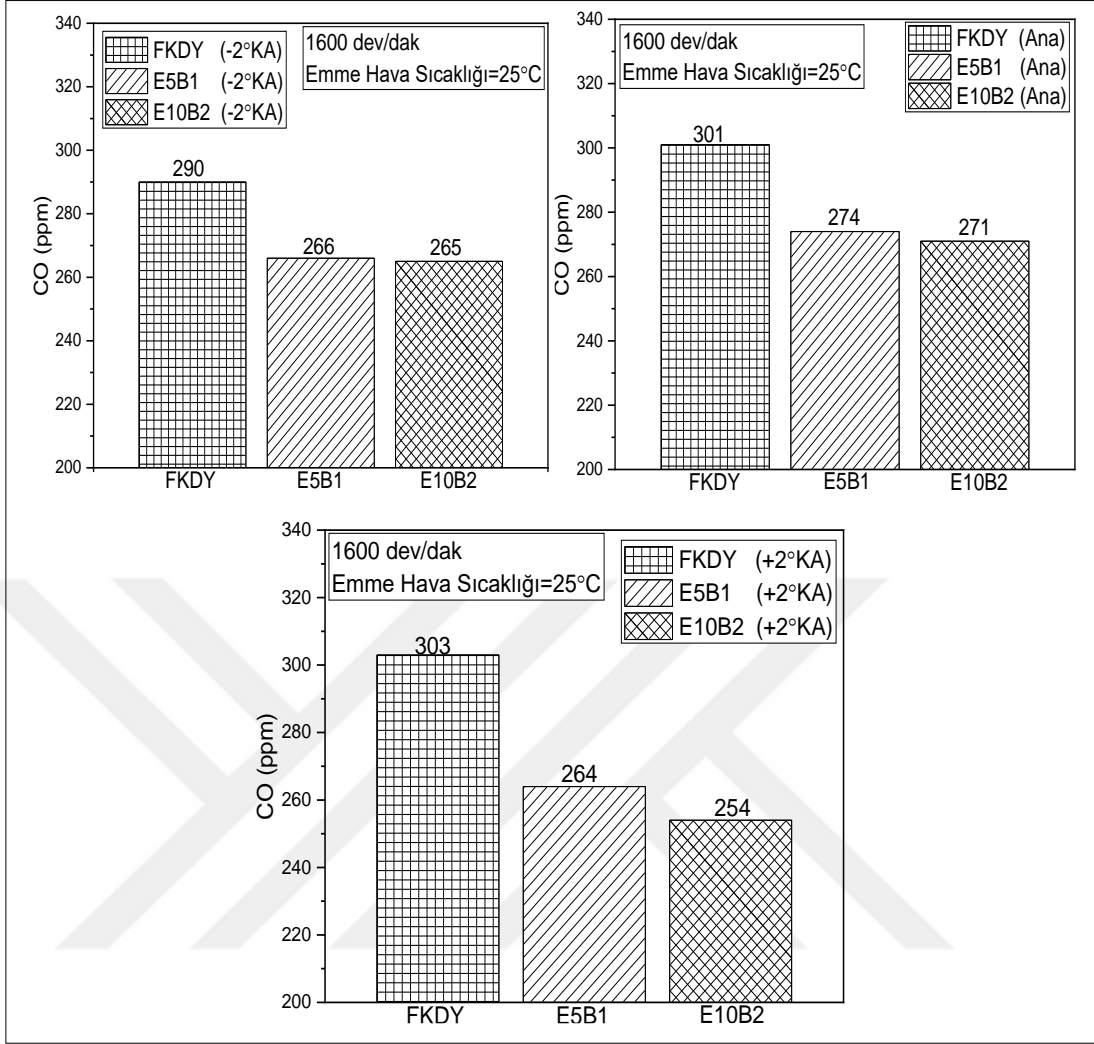
Şekil 4.4'de E5B1, E10B2 ve FKDY yakıtları kullanılarak farklı yakıt püskürtme zamanlamalarında (-2°KA, klasik, +2°KA) CO emisyon salınımının değerleri üzerine etkisi gösterilmiştir. Maksimum CO emisyonu klasik enjeksiyon başlangıç zamanına göre, enjeksiyon zamanlamasının ÜÖN'dan 2° KA uzaklaştırılmasıyla FKDY ile 303 ppm olarak tespit edilirken minimum CO emisyonu E10B2 yakıtı ile aynı enjeksiyon başlangıç zamanında elde edilmiştir. Klasik enjeksiyon başlangıç zamanı ve 8,4° KA ÜÖNÖ'deki püskürtme zamanları ile kıyaslandığında, E5B1 yakıtı için minimum CO emisyon değeri ÜÖNÖ 12,4° KA'daki püskürtme başlangıç zamanında 264 ppm olarak elde edilmiştir.

Ana enjeksiyon başlangıç zamanında maksimum CO emisyon salınımı FKDY ile 301 ppm olarak elde edilirken E5B1 yakıt kullanımında 274 ppm ve E10B2 yakıtı için 271 ppm olarak gözlemlenmiştir. Klasik enjeksiyon başlangıç zamanına göre, püskürtme başlangıç zamanının ÜÖN'ya 2° KA yaklaştırılmasıyla elde edilen değerler ana enjeksiyon başlangıç zamanında elde edilen CO emisyon değerlerinden düşük olduğu görülmüştür. 8,4° KA ÜÖNÖ'deki püskürtme başlangıç zamanında CO emisyon salınımı FKDY için 290 ppm, E5 yakıtı için 266 ve E10 yakıtı için 265 ppm olarak elde edilmiştir. Püskürtme başlangıç zamanlamasının ÜÖN'ya yaklaştırılmasıyla FKDY, E5B1 ve E10B2 yakıtları için CO emisyonunda azalma görülmüştür.

Silindir içindeki oksijen eksikliği ve silindir içi sıcaklığın düşük olması durumunda tam yanma gerçekleşmez ve CO emisyonları oluşabilmektedir. Karışım yakıtları ile elde edilen CO emisyon değerlerinin fosil kökenli dizel yakıt ile elde edilen emisyon değerlerinden düşük olmasının sebebi alkol yakıtlarının içerdiği oksijen miktarı olduğu söylenebilir. Alkol yakıtlar ile elde edilen karışım yakıtlarındaki oksijen miktarı silindir içi yanmayı iyileştirerek eksik yanma ürünü olan CO emisyon miktarını düşürdüğü düşünülmüştür.

#### 4.1.5. Karbondioksit (CO<sub>2</sub>) emisyonu

Şekil 4.5'de E5B1, E10B2 ve FKDY yakıtlarının farklı yakıt püskürtme zamanlamalarında (-2°KA, klasik, +2°KA) CO<sub>2</sub> emisyon salınımının değerleri gösterilmiştir. Maksimum CO<sub>2</sub> emisyonu, FKDY kullanımında püskürtme başlangıç



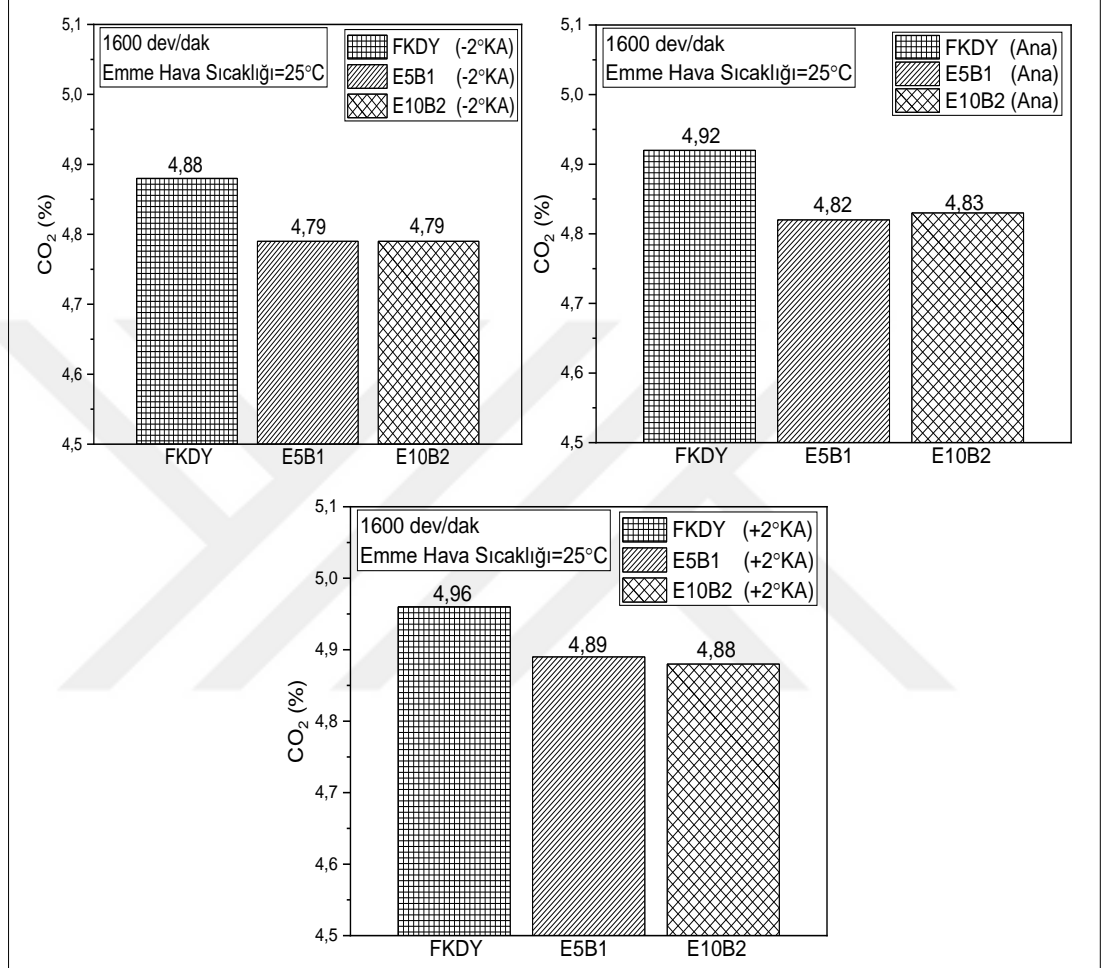
Şekil 4.4. Enjeksiyon başlangıç zamanının CO emisyonu üzerine etkisi

zamanlaması 12,4° KA ayarlandığında %4,96 olarak ölçülürken minimum CO<sub>2</sub> emisyon salınımı 2° KA ÜÖN'ya yaklaştırılması sonucu E5B ve E10B2 yakıt kullanımıyla %4,79 olarak ölçülmüştür.

Klasik enjeksiyon zamanlamasında maksimum CO<sub>2</sub> emisyon salınımına FKDY %4,92 sebep olurken aynı enjeksiyon zamanlamasında E5B1 yakıtla ve E10B2 yakıtıyla CO<sub>2</sub> emisyonunda azalma tespit edilmiştir. Püskürtme başlangıç zamanlaması, klasik enjeksiyon başlangıç zamanına göre 2° KA ÜÖN'ya yaklaştırıldığında maksimum CO<sub>2</sub> emisyon salınımı FKDY ile %4,88 olarak elde edilirken E5B1 yakıtı için %4,79 ve E10B2 yakıtı için %4,79 olarak ölçülmüştür.

Tüm yakıtlar için püskürtme başlangıç zamanı 8,4° KA ÜÖNÖ olduğunda elde edilen CO<sub>2</sub> değerleri en düşük seviyede ölçülmüştür. Diğer taraftan, tüm yakıtlar için en

yüksek CO<sub>2</sub> değeri enjeksiyon zamanlamasının, ana enjeksiyon başlangıç zamanına göre 2° KA ÜÖN'dan uzaklaştırılmasıyla elde edilmiştir. 12,4° KA ÜÖNÖ'de yakıtlar püskürtüldüğünde ölçülen değerler FKDY yakıtı için %4,96 E5B1 yakıtı için %4,89 ve E10B2 yakıtı için %4,88'dir.



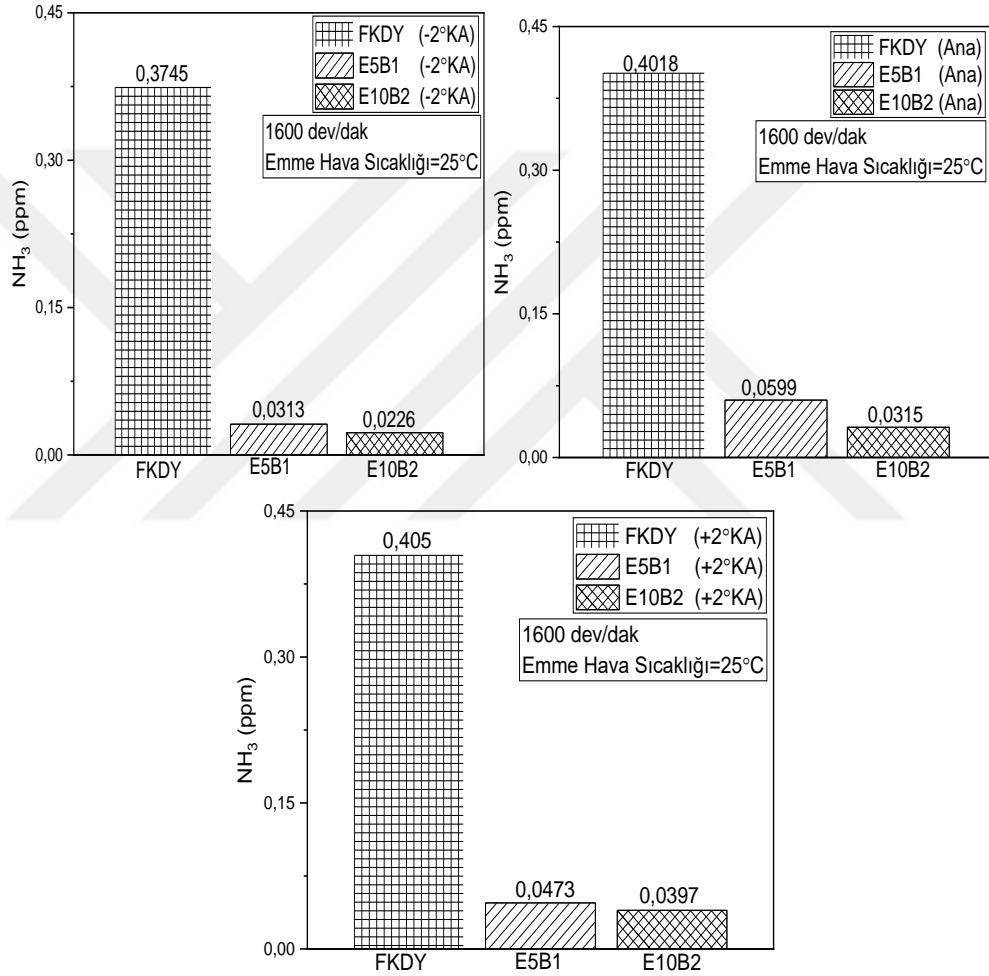
Şekil 4.5. Enjeksiyon başlangıç zamanının CO<sub>2</sub> emisyon üzerine etkisi

CO<sub>2</sub> emisyonunu etkileyen en önemli faktörlerden biri kullanılan yakıtın sahip olduğu C/H oranıdır. Karışım yakıtlarına etanol ve bütanol eklenmesi ile yakıtların C/H oranını azaltmış ve silindirdeki O<sub>2</sub> oranını artırmıştır. Bu sebepten dolayı FKDY ile elde edilen CO<sub>2</sub> emisyonları karışım yakıtları ile elde edilen CO<sub>2</sub> emisyon değerlerinden daha yüksek olduğu düşünülmektedir.

#### 4.1.6. Amonyak (NH<sub>3</sub>) emisyonu

Şekil 4.6'da E5B1, E10B2 ve FKDY yakıtları kullanılarak farklı yakıt püskürtme zamanlamalarında (-2°KA, klasik, +2°KA) Amonyak (NH<sub>3</sub>) emisyon salınım değerleri

üzerine etkisi verilmiştir. Maksimum  $\text{NH}_3$  emisyon salınımı  $12,4^\circ \text{KA}$  ÜÖNÖ'deki püskürtme başlangıç zamanında FKDY ile 0,405 ppm olarak tespit edilirken minimum  $\text{NH}_3$  emisyon değeri E10B2 yakıtı ile 0,0226 ppm olarak  $8,4^\circ \text{KA}$  ÜÖNÖ'deki püskürtme başlangıç zamanında elde edilmiştir. Diğer enjeksiyon zamanları ile kıyaslandığında, tüm yakıt tipleri için minimum  $\text{NH}_3$  emisyon değerleri  $8,4^\circ \text{KA}$  ÜÖNÖ'deki enjeksiyon başlangıç zamanında FKDY için 0,3745, E5B1 yakıtı için 0,0313 ppm ve E10B2 yakıtı için 0,0226 ppm olarak görülmüştür.



Şekil 4.6. Enjeksiyon başlangıç zamanının  $\text{NH}_3$  emisyon üzerine etkisi

Ana enjeksiyon başlangıç zamanında maksimum  $\text{NH}_3$  emisyon salınımına FKDY 0,4018 ppm olarak sebep olurken E5B1 yakıtı kullanımında  $\text{NH}_3$  emisyon salınımı yaklaşık 6,5 kat azalma sağlayarak 0,0599 ppm ve E10B2 yakıt kullanımında  $\text{NH}_3$  emisyon salınımı yaklaşık 13 kat azalma sağlayarak 0,0315 olarak elde edilmiştir. Ana enjeksiyon başlangıç zamanına göre, enjeksiyon başlangıç zamanının ÜÖN'dan  $2^\circ \text{KA}$  uzaklaştırılmasıyla FKDY için 0,405 ppm, E5B1 yakıtı için 0,0473 ve E10B2 yakıtı

için 0.0397 ppm olarak elde edilmiştir. Genel olarak FKDY ile kıyaslandığında karışım yakıtları kullanımı ile NH<sub>3</sub> emisyonunda önemli azalma tespit edilmiştir.

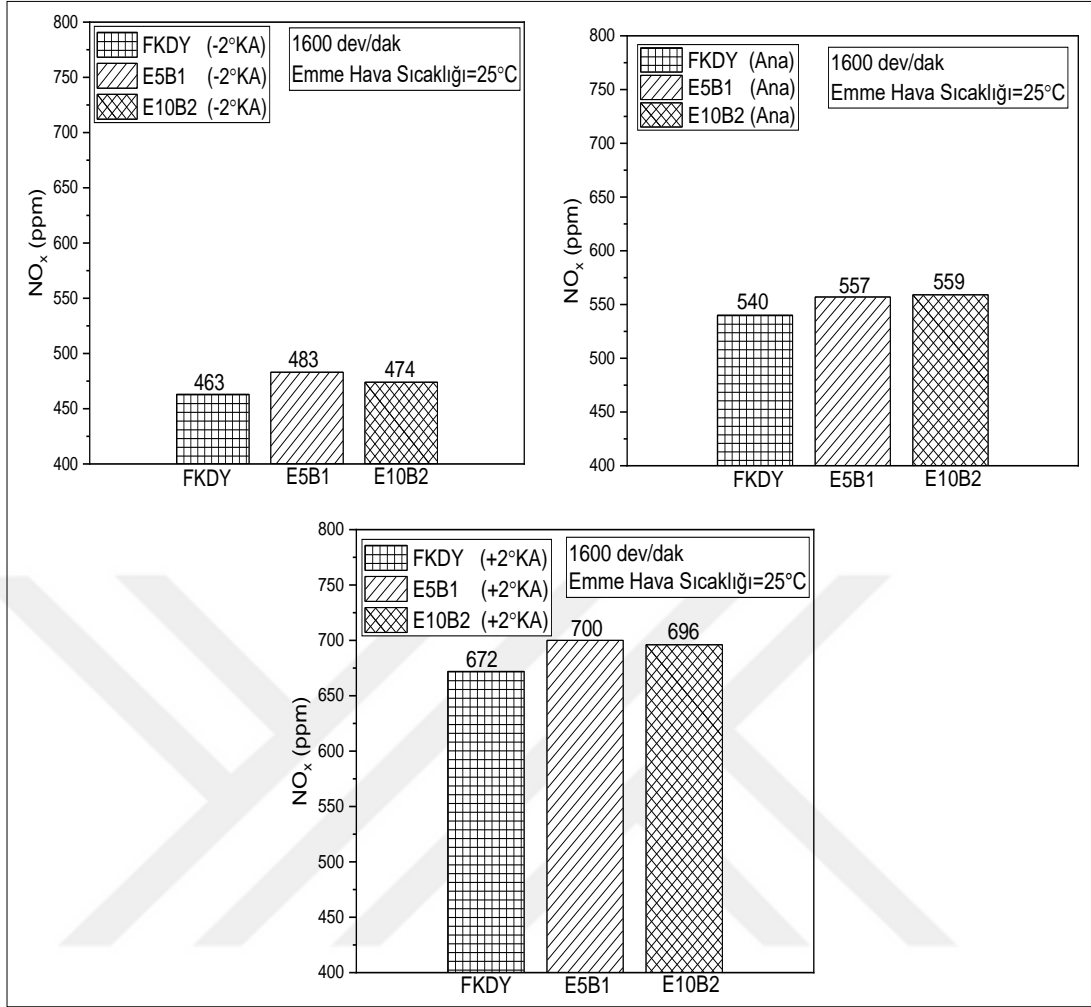
#### **4.1.7. Azotoksit (NO<sub>x</sub>) emisyonu**

Şekil 4.7’de görüldüğü üzere yakıt püskürtme zamanlaması değiştirilerek E5B1, E10B2 ve FKDY yakıtları kullanılmış ve NO<sub>x</sub> emisyon salınımları incelenmiştir. Deneyleerde, farklı enjeksiyon zamanlamalarında (-2° KA, klasik, +2° KA) kullanılan üç farklı yakıt tipinde (E5B1, E10B2 ve FKDY) minimum NO<sub>x</sub> emisyonu klasik enjeksiyon başlangıç zamanına göre enjeksiyon başlangıç zamanının 2° KA ÜÖN’ya yaklaştırılması sonucu FKDY ile 463 ppm olarak gözlemlenirken maksimum NO<sub>x</sub> emisyon salınımı ise E5B1 (700 ppm) yakıtıyla enjeksiyon zamanlamasının 2° KA ÜÖN’den uzaklaştırılmasıyla elde edilmiştir.

Test yapılan tüm enjeksiyon zamanlarında FKDY yakıtıyla elde edilen NO<sub>x</sub> emisyonları E5B1 ve E10B2 yakıtlarıyla elde edilen NO<sub>x</sub> emisyonlarından daha düşük olduğu görülmüştür. Klasik enjeksiyon zamanlamasında, NO<sub>x</sub> emisyonu FKDY ile 540 ppm olarak tespit edilirken E5B1 (557 ppm) ve E10B2 (559 ppm) yakıtlarının kullanımında yaklaşık %3,2 oranında bir artış görülmüştür. Yapılan testlerde, 8,4° KA ÜÖNÖ enjeksiyon başlangıç zamanında NO<sub>x</sub> emisyon salınımının E5B1 (483 ppm), E10B2 (474 ppm) ve FKDY (463 ppm) yakıtı için minimum seviyede olduğu gözlemlenmiştir. Klasik enjeksiyon zamanlamasına göre püskürtme başlangıç zamanının ÜÖN’ya 2° KA yaklaştırılmasıyla her bir yakıt için minimum NO<sub>x</sub> emisyon salınım miktarı elde edilmiştir. Enjeksiyon başlangıç zamanının ÜÖN’ya klasik enjeksiyon başlangıç zamanına göre 2° KA uzaklaştırılmasıyla maksimum NO<sub>x</sub> emisyon değerleri tespit edilmiştir; E5B1 yakıtı (700 ppm), E10B2 yakıtı (696 ppm) ve FKDY ile (672 ppm) olarak gözlemlenmiştir.

NO<sub>x</sub> emisyonu silindir içi yüksek sıcaklıklarda meydana gelen bir gazdır. Karışım yakıtları kullanımı ile NO<sub>x</sub> emisyonlarının yüksek izlenmesinin sebebi alkol yakıtların sahip oldukları oksijen miktarından kaynaklandığı düşünülmektedir. Alkol yakıtlarının sahip olduğu oksijen miktarı karışım yakıtlarındaki oksijen miktarını arttırmaktadır. Artan oksijen miktarı silindir içi yanmayı iyileştirerek yüksek sıcaklıklara ulaşmasını sağladığı ve NO<sub>x</sub> emisyonlarında artışa sebep olduğu düşünülmektedir.





Şekil 4.7. Enjeksiyon başlangıç zamanının NO<sub>x</sub> emisyonu üzerine etkisi

Azotoksit emisyonları silindir içersindeki sıcaklığın değişimine bağlı olarak artan veya azalan bir egzoz gazıdır. Enjeksiyon başlangıç zamanının Üst Ölü Nokta'ya doğru geciktirilmesiyle daha düşük NO<sub>x</sub> emisyon değerlerinin elde edilmesinin sebebi olarak daha fazla yakıtın Üst Ölü Nokta'dan sonra yanmasına bağlı olarak silindir gaz basınç değerleri düşmüştür ve bu durum silindir içi sıcaklığın düşmesine sebep olurken NO<sub>x</sub> emisyonlarında azalmaya sebep olduğu düşünülmektedir. Enjeksiyon başlangıç zamanının, ana enjeksiyon başlangıç zamanına göre Üst Ölü Nokta'dan uzaklaştırılarak erkene alınmasıyla silindir içersine püskürtülen yakıt daha fazla oranda Üst Ölü Nokta'dan önce yanmasından dolayı silindir gaz basınç değerinde ve silindir içi sıcaklık değerinde artışa sebep olduğundan buna bağlı olarak NO<sub>x</sub> emisyonlarında artış izlendiği düşünülmektedir.

## **4.2. Pilot Enjeksiyonun Etkileri**

### **4.2.1. Fren özgül yakıt tüketimi**

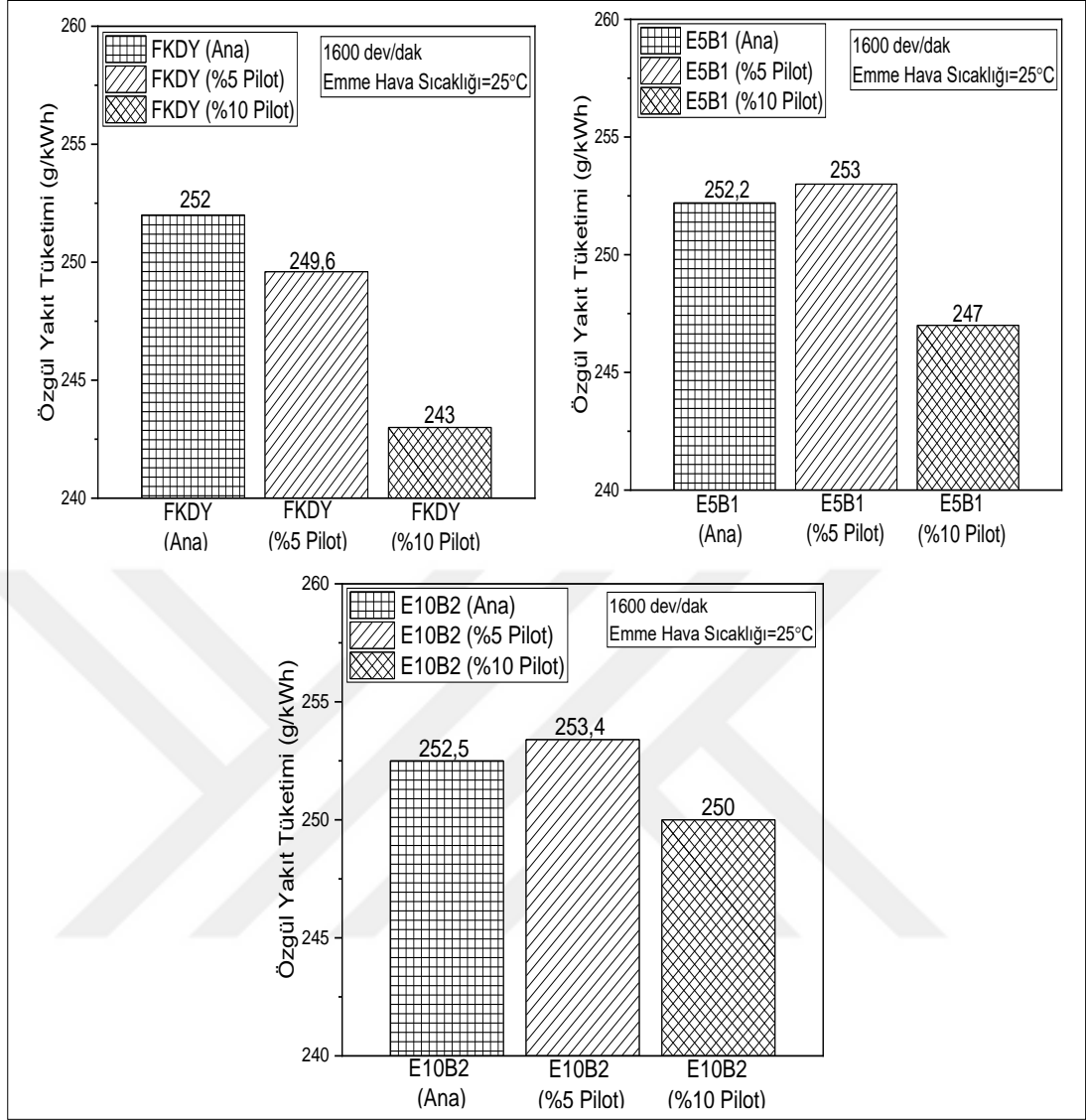
Şekil 4.8’de görüldüğü üzere yakıt püskürtme miktarının değişimi ile E5B1, E10B2 ve FKDY yakıtları kullanılmış ve ÖYT değerleri incelenmiştir. Yapılan testlerin sonucunda, tüm yakıtlar arasında minimum ÖYT değeri %10 pilot enjeksiyon uygulaması ile FKDY kullanımında 243 g/kWh olarak elde edilmiştir. FKDY yakıt kullanımında pilot enjeksiyon miktarındaki artış ile ÖYT değerlerinde azalma izlenmiştir.

Karışımlardaki etanol oranı attıkça ÖYT değerinde artış izlenmiştir. Maksimum ÖYT değeri E10B2 yakıtı kullanımı ile ana enjeksiyon stratejisinde elde edilmiştir. E5B1 yakıt kullanımı ile ana enjeksiyon stratejisinde ÖYT değeri 252,2 g/kWh olarak elde edilirken %5 pilot enjeksiyon uygulamasında ÖYT değeri hafif bir artış göstererek 253 g/kWh olurken %10 pilot enjeksiyon uygulamasında azalma göstererek 247 g/kWh olmuştur.

Tüm yakıt tipleri arasında en yüksek ÖYT değerleri E10B2 yakıtı ile elde edilmiştir. E10B2 yakıtı ile maksimum ÖYT değeri %5 pilot enjeksiyon uygulamasıyla 253,4 g/kWh olarak elde edilirken minimum ÖYT değeri %10 pilot enjeksiyon ile 250 g/kWh olarak tespit edilmiştir. E10B2 yakıtı ile ana enjeksiyon stratejisi ile 252,5 g/kWh olarak izlenmiştir.

### **4.2.2. Isı dağılım oranı**

Şekil 4.9’da farklı pilot enjeksiyon uygulamalarının ve yakıt karışımlarının ısı dağılım oranı üzerine etkisi verilmiştir. Tüm yakıt tipleri ve tüm püskürtme tiplerinde maksimum ısı dağılım oranı FKDY ile ana püskürtme uygulamasındaki değerine göre yaklaşık %118 artarak E10B2 yakıtı ile ana püskürtme tipinde 218 J olarak elde edilmiştir. Fosil kökenli dizel yakıt ile ana püskürtme tipinde maksimum ısı dağılım oranı 100,6 J olarak izlenirken fosil kökenli dizel yakıt için %5 pilot enjeksiyon uygulamasında maksimum ısı dağılım oranı yaklaşık %31 artışla göstererek 131,5 J olarak tespit edilmiştir.



Şekil 4.8. Pilot enjeksiyon stratejilerinin özgül yakıt tüketimi üzerine etkisi

FKDY tipinde %10 pilot enjeksiyon ile FKDY ana enjeksiyon uygulamasıyla kıyaslandığında, %10 pilot enjeksiyon uygulamasıyla maksimum ısı dağılım oranı yaklaşık %24 azalma ile 76 J olarak görülmüştür. FKDY ana püskürtme uygulamasıyla kıyaslandığında, E5B1 ana ve E5B1 %5 pilot püskürtme yöntemlerinde maksimum ısı dağılım oranı değeri ile maksimum ısı dağılım oranında artış tespit edilirken E5B1 %10 pilot püskürtme tipinde ısı dağılım oranında azalma görülmüştür.

E5B1 yakıtı için ısı dağılım oranları şu şekildedir: E5B1 ana uygulaması için 171,8 J, E5B1 %5 pilot enjeksiyon uygulaması için 132,5 J ve E5B1 %10 pilot enjeksiyon tipi için 85,7 J'dür. FKDY ana enjeksiyon uygulamasıyla kıyaslandığında, E10B2 %5 pilot enjeksiyon tipinde ve E10B2 %10 pilot enjeksiyon tipinde maksimum ısı dağılım

oranında azalma izlenirken E10B2 ana püskürtme tipinde maksimum ısı dağılım oranında artış izlenmiştir.

#### **4.2.3. Silindir gaz basıncı**

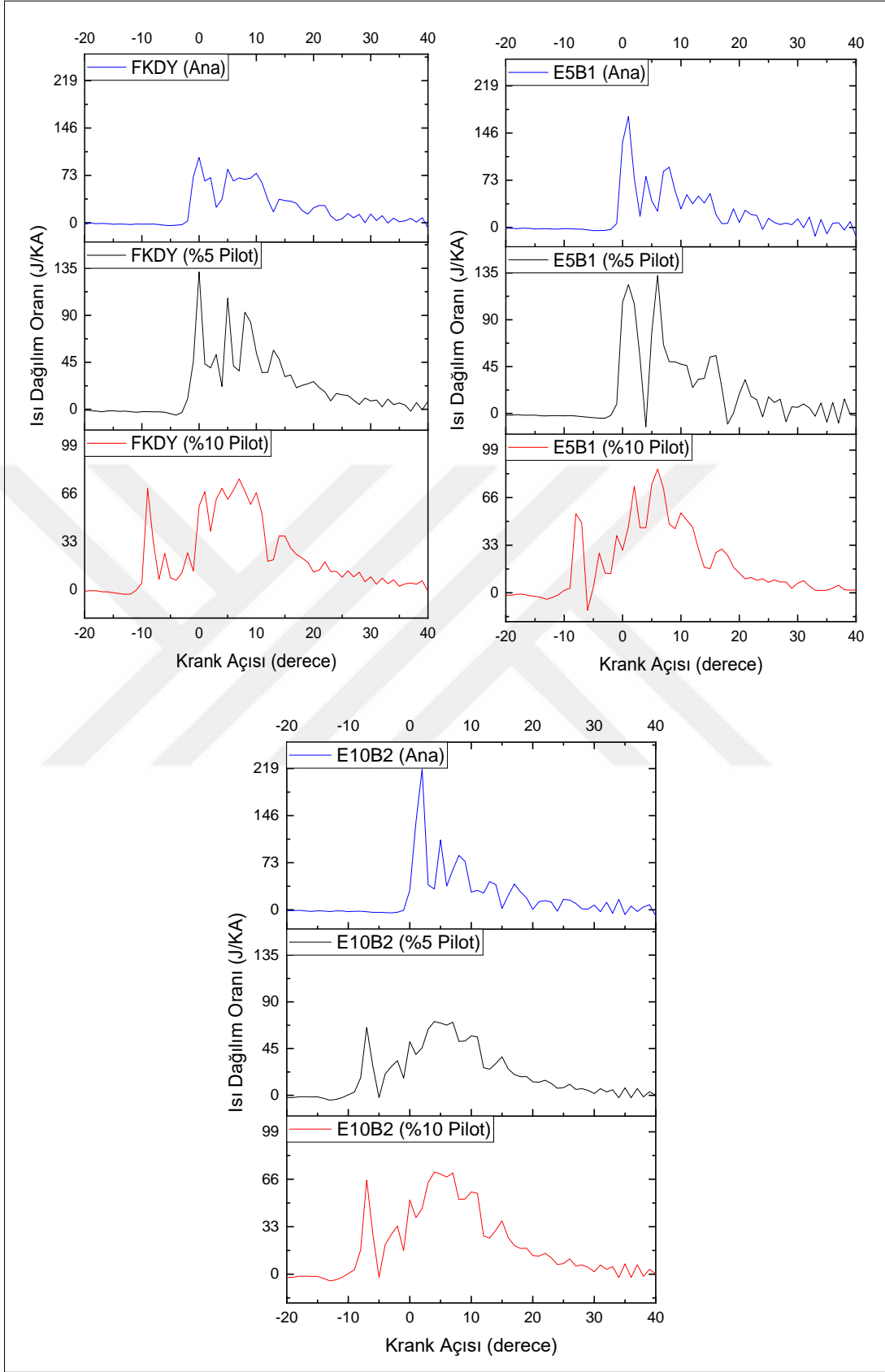
Şekil 4.10'da farklı enjeksiyon uygulamalarının ve etanol-dizel yakıt karışımlarının silindir gaz basıncı üzerine etkisi gösterilmiştir. FKDY ana enjeksiyon başlangıç zamanı ile silindir gaz basıncı 80 bar olarak elde edilirken FKDY %5 pilot (78 bar) enjeksiyon uygulaması ile 2 bar azalma görülürken FKDY %10 pilot (85,6 bar) enjeksiyonla 5,6 bar artış izlenmiştir. Tüm yakıt ve püskürtme tipleri arasında en yüksek maksimum silindir gaz basınç değerleri %10 pilot enjeksiyon uygulamasıyla elde edilmiştir.

E5B1 ana püskürtme tipi ile elde edilen maksimum silindir gaz basınç değeri 81 bar, E5B1 %5 pilot enjeksiyon ile 79,5 bar ve E5B1 %10 pilot enjeksiyon ile 82,4 bar olarak tespit edilmiştir. FKDY ana enjeksiyon silindir gaz basınç değeri ile kıyaslandığında E10B2 ana (80,6 bar) püskürtme ile 0,6 bar artış izlenmiştir. FKDY ana enjeksiyon uygulaması ile karşılaştırıldığında, E10B2 yakıtı %5 pilot püskürtme ve E10B2 yakıtı %10 püskürtme uygulamasında yaklaşık 3,7 bar artış görülmüştür.

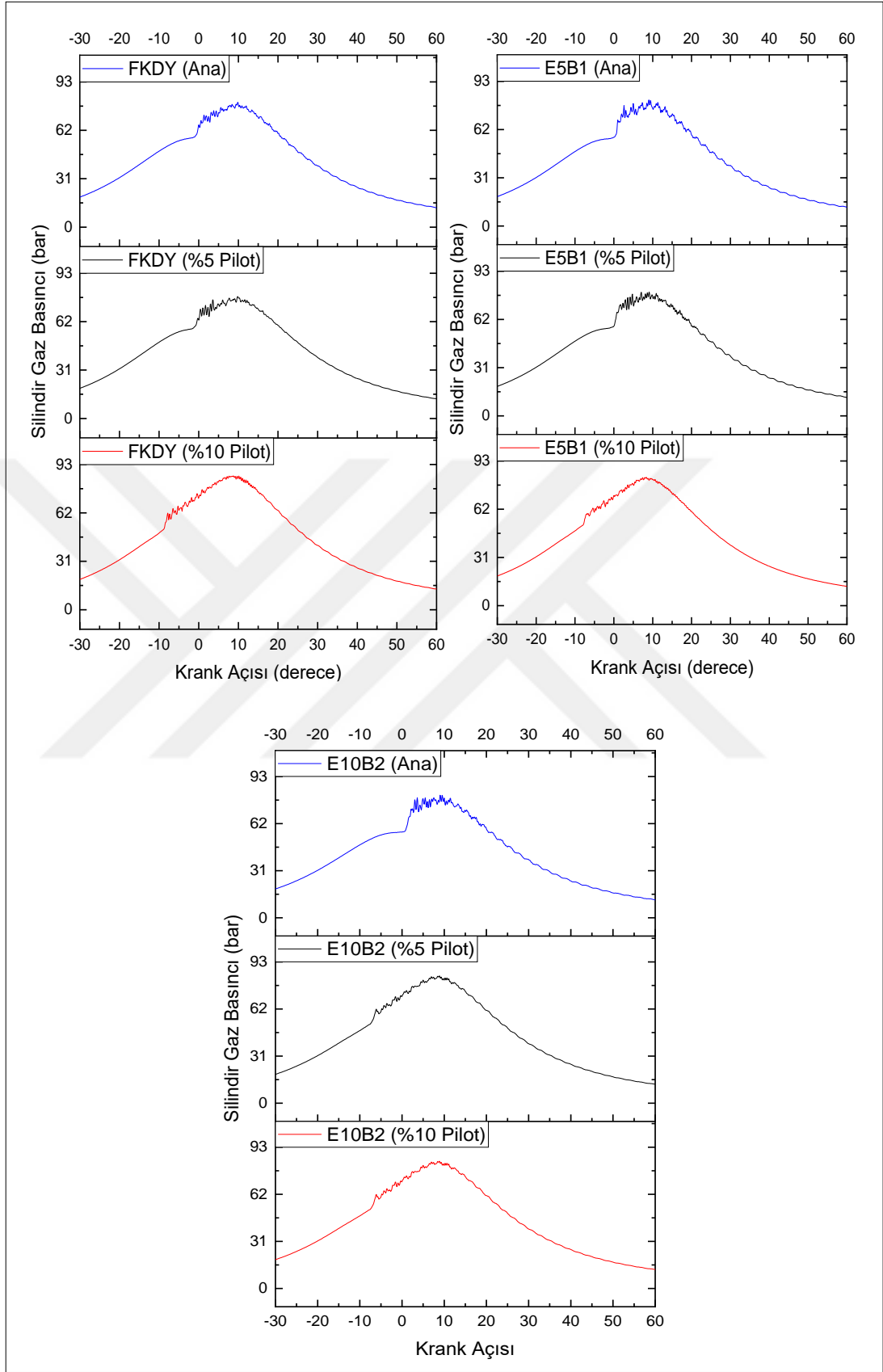
#### **4.2.4. Karbonmonoksit (CO) emisyonu**

Şekil 4.11'de farklı enjeksiyon stratejilerinin ve etanol-dizel yakıt karışımlarının kullanılmasının CO emisyonu üzerine etkisi verilmiştir. FKDY ana (301 ppm) ile kıyaslandığında FKDY %5 (304 ppm) ve FKDY %10 (305 ppm) pilot enjeksiyon ile yakıtlar püskürtüldüğünde hafif bir miktarda CO emisyonlarında artış izlenmiştir. E5B1 ve E10B2 yakıt kullanımıyla FKDY'a göre CO emisyonlarında yaklaşık %10 oranında azalma görülmüştür. E5B1 yakıtıyla ana püskürtme yapıldığında 274 ppm CO emisyonu ölçülürken E5B1 %5 pilot enjeksiyon ile CO emisyonunda 5 ppm azalma sağlanmıştır ve E5B1 %10 pilot enjeksiyon ile CO emisyonlarında 7 ppm artış tespit elde edilmiştir.

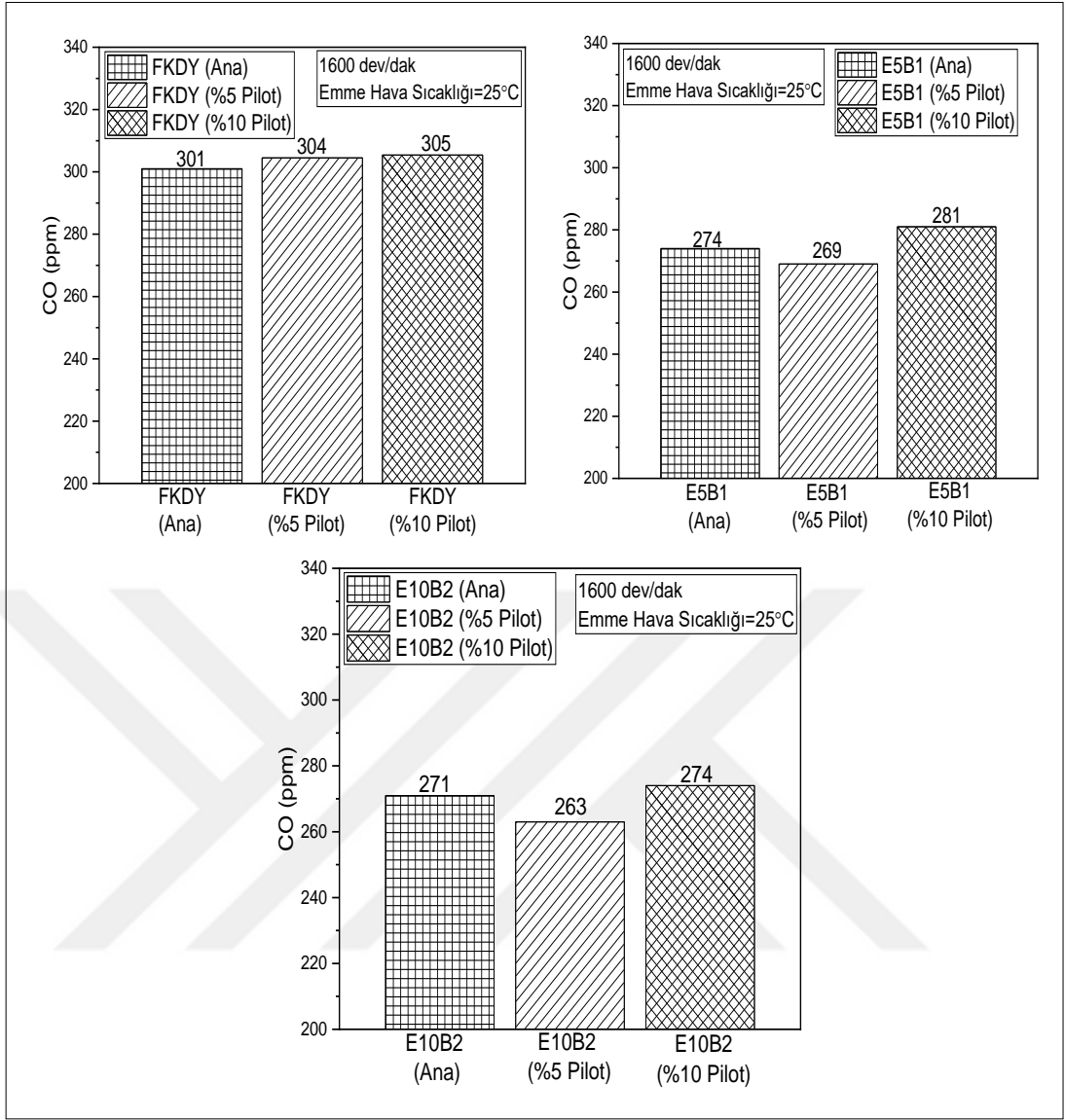
E10B2 yakıtı ile maksimum CO emisyonu %10 pilot enjeksiyon ile yakıtlar püskürtüldüğünde 274 ppm olarak elde edilirken E10B2 yakıtıyla ana püskürtme



Şekil 4.9. Pilot enjeksiyon stratejilerinin ısı dağılım oranı üzerine etkisi



Şekil 4.10. Pilot enjeksiyon stratejilerinin silindir gaz basıncı üzerine etkisi



Şekil 4.11. Pilot enjeksiyon stratejilerinin CO emisyonu üzerine etkisi

yapıldığında CO emisyon değeri 271 ppm olarak tespit edilmiştir. Tüm yakıt tipleri ve tüm püskürtme tiplerinde minimum CO emisyon değeri E10B2 yakıtı ile %5 pilot enjeksiyon uygulamasıyla 263 ppm olarak izlenmiştir.

#### 4.2.5. Karbondioksit (CO<sub>2</sub>) emisyonu

Şekil 4.12’de etanol-dizel yakıt karışımlarının kullanılmasıyla farklı enjeksiyon stratejilerinin CO<sub>2</sub> emisyonu üzerine etkisi gösterilmiştir. E5B1 ve E10B2 yakıt kullanımlarıyla karşılaştırıldığında FKDY kullanımıyla her bir püskürtme tipinde daha yüksek CO<sub>2</sub> emisyon salınımı izlenmiştir. FKDY ile ana püskürtme yapıldığında %4,92 emisyon değeri görülürken, FKDY %5 pilot enjeksiyonda emisyon değeri

düşük bir artışla ile %4,93 olmuştur ve FKDY %10 pilot enjeksiyonu ile maksimum CO<sub>2</sub> emisyon değeri %10'dan yüksek bir artışla %5,67 olarak elde edilmiştir.

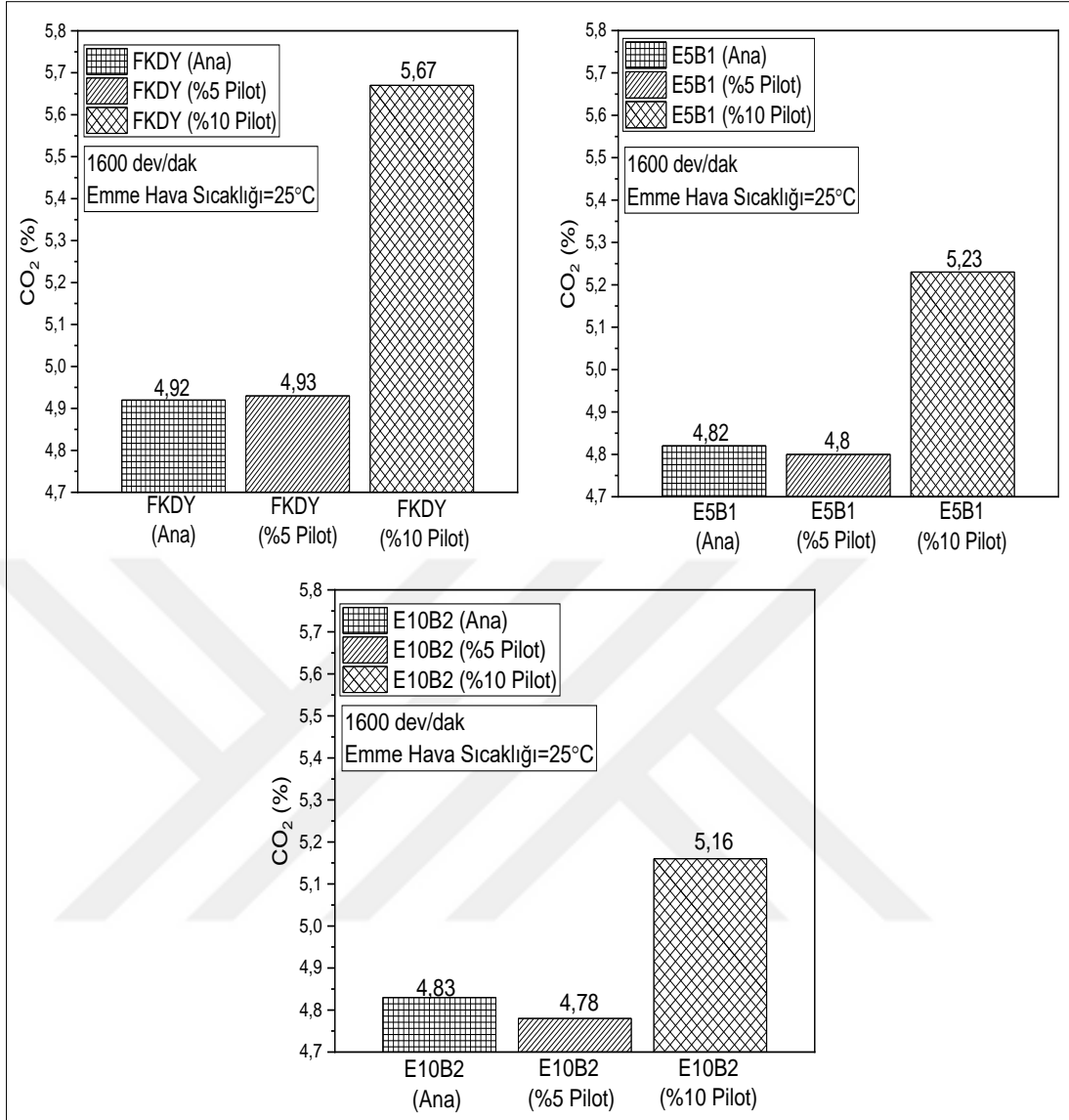
FKDY ile ana püskürtme tipi kullanımıyla elde edilen CO<sub>2</sub> emisyon değeri ile karşılaştırıldığında, E5B1 yakıtı ana püskürtme tipi (%4,82) ve E5B1 yakıtı %5 pilot enjeksiyon tipinde (%4,8) daha düşük CO<sub>2</sub> değeri görülmüştür. Ancak, E5B1 yakıtı %10 pilot enjeksiyon tipinde CO<sub>2</sub> emisyon değeri FKDY ile ana enjeksiyon başlangıç zamanında elde edilen CO<sub>2</sub> emisyon değerinden %3'den fazla artış göstererek %5,23 olmuştur. Tüm yakıtlar ve püskürtme yöntemleri içinde minimum CO<sub>2</sub> emisyon değeri E10B2 yakıtı %5 pilot enjeksiyonu ile %4,78 olmuştur. FKDY ana püskürtme tipine göre E10B2 ana püskürtme yöntemi kullanımı ile CO<sub>2</sub> emisyonu %4,83'e düşerken E10B2 yakıtı %10 pilot enjeksiyonda CO<sub>2</sub> emisyon değeri %5,16 olmuştur.

#### **4.2.6. Amonyak emisyonu (NH<sub>3</sub>)**

Şekil 4.13 etanol-dizel yakıt karışımları ile ana, %5 ve %10 pilot enjeksiyon uygulamalarının NH<sub>3</sub> emisyonu üzerine etkisi verilmiştir. Tüm yakıt tipleri ve tüm püskürtme tiplerinde maksimum NH<sub>3</sub> emisyon değeri FKDY ana (0,4018 ppm) püskürtme stratejisine göre yaklaşık %5 artış ile FKDY %10 pilot enjeksiyon püskürtmesiyle 0,4204 ppm olarak elde edilmiştir. Ancak FKDY %5 pilot enjeksiyon püskürtme yönteminde NH<sub>3</sub> emisyon değeri 0,3734 ppm değerine düşmüştür. FKDY kullanımıyla karşılaştırıldığında, karışım yakıt kullanımıyla NH<sub>3</sub> emisyon değerinin önemli miktarda düştüğü izlenmiştir.

E5B1 ana püskürtme ile NH<sub>3</sub> değeri 0,0599 ppm olarak elde edilirken NH<sub>3</sub> emisyon değerinde E5B1 %5 pilot (0,0502 ppm) enjeksiyon yöntemiyle %15'den fazla bir azalma görülmüş ancak E5B1 %10 pilot (0,09 ppm) püskürtme ile yaklaşık %50 artış izlenmiştir. Tüm yakıt tipi ve tüm püskürtme stratejilerinde minimum NH<sub>3</sub> emisyon değeri E10B2 yakıtı ana püskürtme ile 0,0315 olarak tespit edilmiştir. FKDY ana püskürtme değerine göre E10B2 yakıtı %5 pilot (0,0508 ppm) enjeksiyon ile yaklaşık 8 kat azalma sağlanırken E10B2 yakıtı %10 pilot (0,0715 ppm) püskürtme ile yaklaşık 6,5 kat azalma görülmüştür.

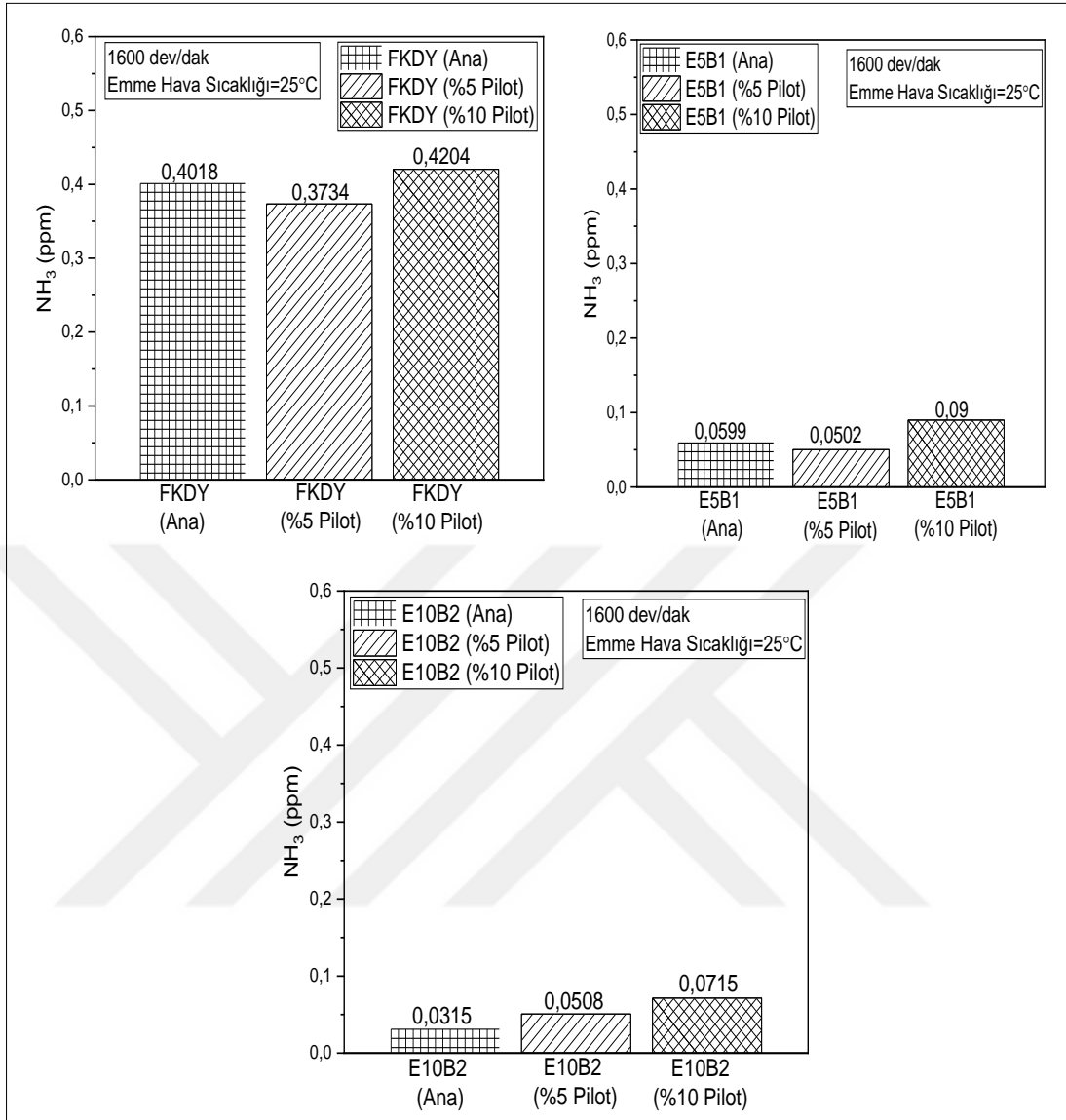




Şekil 4.12. Pilot enjeksiyon stratejilerinin CO<sub>2</sub> emisyonu üzerine etkisi

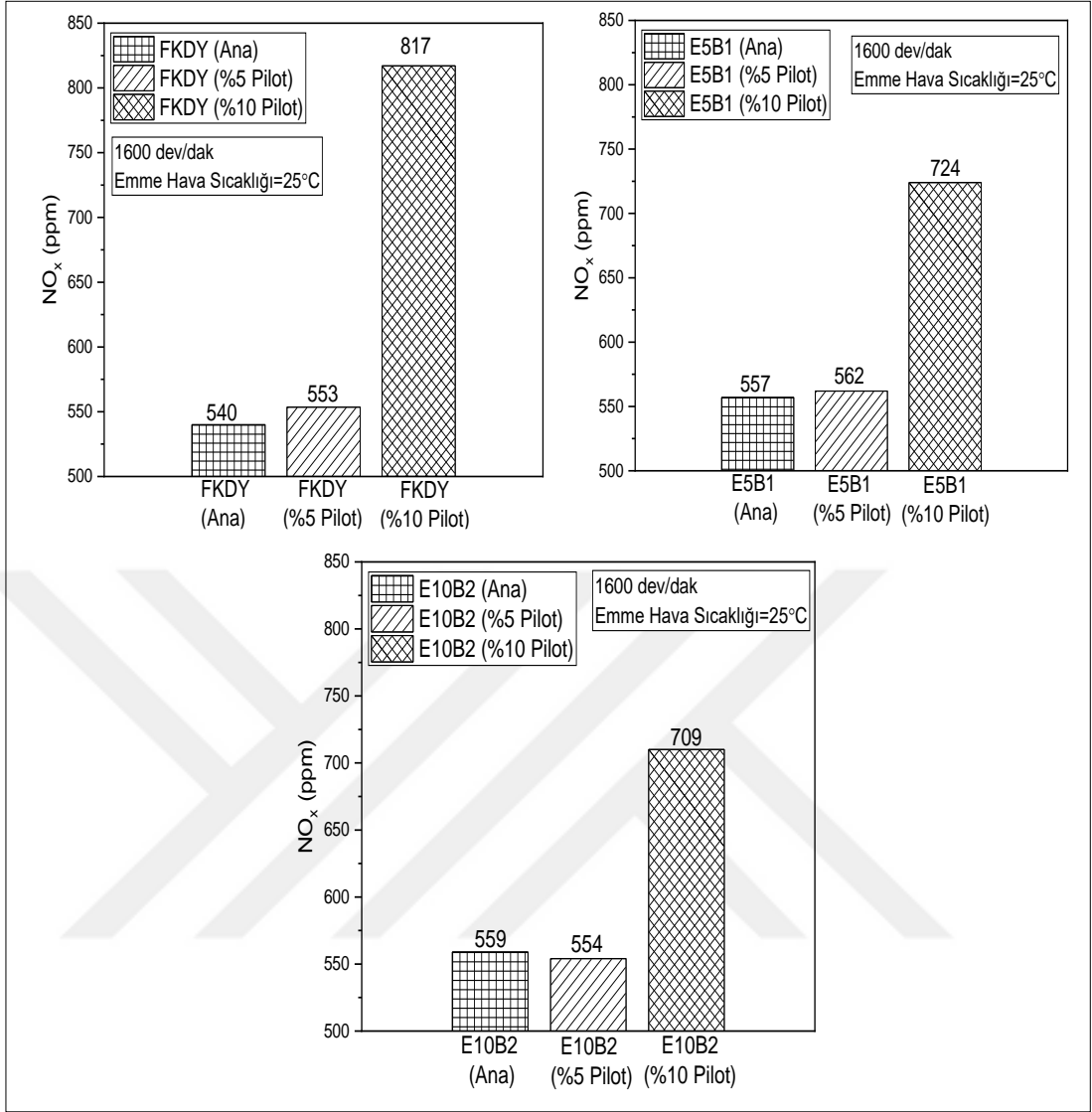
#### 4.2.7. Azotoksit (NO<sub>x</sub>) emisyonu

Şekil 4.14'de farklı etanol-dizel yakıt karışımları ile püskürtme stratejilerinin NO<sub>x</sub> emisyonu üzerine etkisi gösterilmiştir. Tüm yakıt tipleri ve püskürtme yöntemleri kıyaslandığında, minimum NO<sub>x</sub> emisyon değeri FKDY ana enjeksiyon yöntemi ile 540 ppm olarak elde edilmiştir. FKDY ana ile elde edilen emisyon değeri ile karşılaştırılınca FKDY %5 pilot enjeksiyon yöntemi kullanımında NO<sub>x</sub> emisyon değeri hafif bir artış ile 553 ppm olarak tespit edilmiş ve FKDY ile maksimum NO<sub>x</sub> emisyon değeri %10 pilot enjeksiyon yöntemi kullanımında 817 ppm olarak izlenmiştir.



Şekil 4.13. Pilot enjeksiyon stratejilerinin NH<sub>3</sub> emisyonu üzerine etkisi

FKDY ana püskürtme değerine göre E5B1 yakıtı ile tüm püskürtme yöntemlerinde NO<sub>x</sub> emisyon değerinin daha yüksek olduğu izlenmiştir. NO<sub>x</sub> emisyon değerleri E5B1 ana ile 557 ppm, E5B1 %5 pilot ile 562 ppm ve E5B1 %10 pilot ile 724 ppm olarak tespit edilmiştir. E10B2 yakıtı kullanımında en yüksek NO<sub>x</sub> emisyon değeri %10 pilot enjeksiyon sonucu 709 ppm olarak tespit edilirken E10B2 ana püskürtme yönteminde 559 ppm ve E10B2 yakıtı %5 pilot enjeksiyon ile 554 ppm olarak görülmüştür.



Şekil 4.14. Pilot enjeksiyon stratejilerinin NO<sub>x</sub> emisyonu üzerine etkisi

## 5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

### 5.1. Sonuçlar

Bu çalışma da hava kirliliği üzerinde büyük etkisi olan ve belirli ülkelerin tekelinde bulunan petrol kökenli yakıtların kullanıldığı içten yanmalı motorların egzoz emisyonlarını, yakıt tüketimlerini ve fosil kökenli yakıtların kullanımını azaltmak için fosil kökenli yakıtla karışım oluşturularak kullanılabilirliği ile farklı enjeksiyon parametreleri üzerine çalışılarak tek silindirli bir dizel motorda fosil kökenli dizel yakıtı ve etanol karışımlarının çalışma olanakları ve enjeksiyon parametrelerinin yanma ve egzoz emisyonları üzerine etkisi araştırılmıştır. Sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenebilir.

Etanol-dizel yakıt karışımlarına, karışım yakıtlarındaki etanol miktarının %20'si oranında 2-bütanol eklenmesiyle yakıt karışımlarında gözle görülebilir bir faz ayrışımı tespit edilmemiştir.

ÖYT değerleri incelendiğinde enjeksiyon başlangıç zamanı ÜÖN'dan uzaklaştırıldıkça tüm yakıt tipleri için özgül yakıt tüketiminde azalma izlenmiştir. Maksimum ÖYT değeri 8.4° KA ÜÖNÖ'deki enjeksiyon başlangıç zamanında 255,6 g/kWh olarak E10B2 yakıtı ile elde edilmiştir. Minimum ÖYT değeri 248,4 g/kWh olarak FKDY ile enjeksiyon başlangıç zamanının 2° KA ÜÖN'dan uzaklaştırılmasıyla tespit edilmiştir. Genel olarak FKDY ile karşılaştırıldığında karışım yakıtlarındaki etanol oranı arttıkça ÖYT değerlerinde artış görülmüştür.

FKDY kullanımında, ana enjeksiyon ile kıyaslandığında pilot enjeksiyon oranı arttıkça ÖYT değerinde azalış görülmüştür. FKDY ile minimum ÖYT değeri %10 pilot enjeksiyon uygulamasında ana enjeksiyona göre %3'ten fazla azalma sağlayarak 243 g/kWh olarak tespit edilmiştir. Karışım yakıtları kullanımında, ana enjeksiyona göre, %5 pilot enjeksiyon uygulamasında artış görülürken %10 pilot enjeksiyon uygulamasında azalma tespit edilmiştir. E5B1 yakıtı için minimum ÖYT değeri %10

pilot enjeksiyonda 247 g/kWh ve E10B2 yakıtı için minimum ÖYT değeri 250 g/kWh olarak elde edilmiştir.

Tüm enjeksiyon başlangıç zamanlarında E5B1 ve E10B2 yakıtları kullanımı ile elde edilen maksimum ısı dağılım oranı değerleri FKDY ile elde edilen değerlerden daha yüksek olduğu görülmüştür. FKDY ile maksimum ısı dağılım oranı enjeksiyon başlangıç zamanının ÜÖN'ya yaklaştırılmasıyla 104,8 J olarak elde edilirken E5B1 yakıtı ile maksimum ısı dağılım oranı ana enjeksiyon başlangıç zamanında 171,8 J olarak gözlemlenmiştir. E10B2 yakıtı ile maksimum ısı dağılım oranı 218 J olarak ana enjeksiyon başlangıç zamanında elde edilmiştir.

FKDY ile uygulanan yakıt püskürtme stratejilerinin ısı dağılım oranları üzerine etkisi incelendiğinde, ana enjeksiyon uygulamasına göre, %5 pilot enjeksiyon uygulamasında yaklaşık %31 oranında artış görülürken %10 pilot uygulamasında ise yaklaşık %24 azalma görülmüştür. E5B1 yakıtı için pilot enjeksiyon oranı arttıkça maksimum ısı dağılım oranı değerinde azalma izlenmiştir. Tüm enjeksiyon miktarları ve yakıt tiplerinde maksimum ısı dağılım oranı değeri E10B2 yakıtı ile 218 J elde edilirken E10B2 %5 pilot ve %10 değerleri birbirine yakın olarak görülmüştür.

Tüm yakıtlar için ana enjeksiyon başlangıç zamanına göre, enjeksiyon başlangıç zamanının ÜÖN'dan uzaklaştırılmasıyla (12,4° KA ÜÖNÖ) elde edilen silindir gaz basınç değerlerinde artış izlenirken ana enjeksiyon başlangıç zamanına göre, enjeksiyon başlangıç zamanının ÜÖN'ya yaklaştırılmasıyla (8,4° KA ÜÖNÖ) silindir gaz basınç değerlerinde azalma tespit edilmiştir. Tüm yakıtlar ve enjeksiyon zamanları kıyaslandığında maksimum silindir gaz basınç değeri 12,4° KA ÜÖNÖ enjeksiyon başlangıç zamanında E10B2 yakıtı ile 88 bar olarak elde edilirken minimum silindir gaz basınç değeri FKDY ile 74,7 bar olarak görülmüştür.

Tüm yakıt tipleri ve enjeksiyon miktarlarında her bir yakıt için maksimum silindir gaz basınç değerleri %10 pilot enjeksiyon uygulamasında FKDY ile 85,6 bar, E5B1 yakıtı ile 82,4 bar ve E10B2 yakıtı ile 83,7 bar olarak tespit edilmiştir. Ana enjeksiyon uygulaması ile kıyaslandığında, FKDY ve E5B1 yakıtı ile %5 pilot enjeksiyon uygulamasında maksimum silindir gaz basınç değerlerine azalma izlenirken E10B2 yakıtı kullanımı ile %5 pilot enjeksiyon uygulamasında artış tespit edilmiştir.

FKDY ile maksimum CO emisyon değeri 12,4° KA ÜÖNÖ enjeksiyon başlangıç zamanında 303 ppm olarak elde edilirken karışım yakıtları olan E5B1 ve E10B2 yakıtları ile maksimum CO emisyon değerleri ana enjeksiyon zamanında sırasıyla 274 ppm ve 271 ppm olarak ölçülmüştür. Tüm enjeksiyon zamanlarında karışım yakıtlarındaki etanol oranı arttıkça CO emisyonlarında azalma tespit edilmiştir. Karışım yakıtları için minimum CO emisyon değerleri 12,4° KA ÜÖNÖ enjeksiyon başlangıç zamanında elde edilirken FKDY için minimum CO emisyon değeri 8,4° KA ÜÖNÖ enjeksiyon başlangıç zamanında elde edilmiştir.

Tüm enjeksiyon uygulamalarında FKDY ile elde edilen CO emisyon değerlerinin karışım yakıtları ile elde edilen değerlerden daha yüksek olduğu izlenmiştir. Tüm yakıt tipleri için maksimum CO emisyon değerleri %10 pilot enjeksiyon uygulamasında FKDY için 305 ppm, E5B1 yakıtı için 281 ppm ve E10B2 yakıtı için 274 ppm olarak bulunmuştur. FKDY ile kıyaslandığında, karışım yakıtlarındaki etanol oranı arttıkça CO emisyonlarında azalma görülmüştür. Karışım yakıtları için minimum CO emisyon değerleri %5 pilot enjeksiyon uygulamasında E5B1 yakıtı için 269 ppm ve E10B2 yakıtı için 262 ppm olarak elde edilmiştir.

Tüm yakıt tipleri için maksimum CO<sub>2</sub> emisyon değerleri ana enjeksiyon başlangıç zamanına göre, enjeksiyon başlangıç zamanının ÜÖN'dan uzaklaştırılmasıyla yakıtların püskürtülmesiyle elde edilirken minimum CO<sub>2</sub> emisyon değerleri ana enjeksiyon başlangıç zamanına göre, enjeksiyon başlangıç zamanının ÜÖN'ya yaklaştırılmasıyla yakıtların püskürtülmesi ile elde edilmiştir. Tüm enjeksiyon zamanlarında FKDY ile tespit edilen CO<sub>2</sub> emisyon değerleri E5B1 yakıtı ve E10B2 yakıtı ile elde edilen CO<sub>2</sub> emisyon değerlerinden daha yüksek olduğu görülmüştür. Tüm enjeksiyon zamanlarında FKDY ile karşılaştırıldığında, karışım yakıtları kullanımı ile yaklaşık %2 oranında azalma görülmüştür.

Pilot enjeksiyon stratejileri için tüm yakıt tipleri için maksimum CO<sub>2</sub> emisyonuna %10 pilot enjeksiyon uygulaması sebep olmuştur. FKDY ile karşılaştırıldığında karışım yakıtları kullanımında CO<sub>2</sub> emisyonlarında azalma izlenmiştir. Tüm yakıt tipleri ve enjeksiyon uygulamaları kıyaslandığında maksimum CO<sub>2</sub> emisyon değeri FKDY ile %10 pilot enjeksiyon uygulamasında elde edilmiştir. Alkol yakıtları için minimum

CO<sub>2</sub> emisyon değerleri %5 pilot enjeksiyon uygulamasında E5B1 yakıtı için %4,8 olarak elde edilirken, E10B2 yakıtı için %4,78 olarak elde edilmiştir.

Maksimum NH<sub>3</sub> emisyonu FKDY ile 12,4° KA ÜÖNÖ açısında 0,405 ppm olarak tespit edilirken E5B1 yakıtı ile maksimum NH<sub>3</sub> değeri 0,0599 ppm ve E10B2 yakıtı ile maksimum NH<sub>3</sub> değeri 0,0315 ppm olarak ana enjeksiyon başlangıç zamanında elde edilmiştir. Tüm enjeksiyon zamanlarında FKDY ile kıyaslandığında, karışım yakıtlarındaki etanol oranı arttıkça NH<sub>3</sub> emisyonunda azalma izlenmiştir. Tüm enjeksiyon zamanlarında FKDY ile kıyaslandığında, E5B1 yakıtı kullanımı ile %6,5'den fazla azalma izlenirken E10B2 yakıtı kullanımında %10'dan fazla azalma izlenmiştir. Minimum NH<sub>3</sub> emisyon değerleri 8.4° KA ÜÖNÖ püskürtme başlangıç zamanında görülmüştür.

Pilot enjeksiyon stratejileri kıyaslandığında, her bir yakıt için maksimum NH<sub>3</sub> emisyon değerleri %10 pilot enjeksiyon uygulamasında FKDY için 0,4204 ppm, E5B1 yakıtı için 0,09 ppm ve E10B2 yakıtı için 0,0715 ppm olarak elde edilmiştir. FKDY ile ana enjeksiyon uygulamasıyla kıyaslandığında, FKDY %5 pilot uygulamasında %5'ten fazla NH<sub>3</sub> emisyonlarında azalma izlenirken %10 pilot uygulamasında yaklaşık %5 oranında NH<sub>3</sub> emisyonlarında artış izlenmiştir. E5B1 ile ana enjeksiyon uygulamasıyla kıyaslandığında, E5B1 %5 pilot uygulamasında NH<sub>3</sub> emisyonunda yaklaşık %15 azalma izlenirken %10 pilot uygulamasında yaklaşık %50 oranında NH<sub>3</sub> emisyonlarında artış görülmüştür. E10B2 ile ana enjeksiyon uygulamasıyla karşılaştırıldığında, E10B2 %5 pilot uygulamasında %50'den fazla artış tespit edilirken %10 pilot uygulamasında %100'den fazla NH<sub>3</sub> emisyonlarında artış tespit edilmiştir.

Tüm yakıt tipleri için maksimum NO<sub>x</sub> emisyon değerleri 12,4° KA ÜÖNÖ püskürtme başlangıç zamanında E5B1 yakıtı ile 700 ppm, E10B2 yakıtı ile 696 ppm ve FKDY 672 ppm olarak elde edilmiştir. Tüm enjeksiyon zamanlarında karışım yakıtları kullanımında elde edilen NO<sub>x</sub> emisyon değerleri FKDY ile elde edilen değerlerden daha yüksek olduğu izlenmiştir. Ana enjeksiyon başlangıç zamanı ile kıyaslandığında, 8,4° KA ÜÖNÖ püskürtme başlangıç zamanında FKDY ile %15'ten fazla azalma izlenirken E5B1 yakıt kullanımında %10'dan fazla azalma ve E10B2 yakıt kullanımında yaklaşık %13 azalma görülmüştür.

NO<sub>x</sub> emisyonu için pilot enjeksiyon stratejileri karşılaştırıldığında, ana enjeksiyon ve %5 pilot enjeksiyon uygulamasında E5B1 ve E10B2 yakıtlarının sebep olduğu NO<sub>x</sub> emisyonlarının FKDY ile elde edilen NO<sub>x</sub> emisyonlarından daha yüksek olduğu görülmüştür. Tüm pilot enjeksiyon stratejileri karşılaştırıldığında %10 pilot enjeksiyon ile tüm yakıt tipleri için maksimum NO<sub>x</sub> emisyonları elde edilmiştir. %10 pilot enjeksiyon uygulamasında, FKDY kullanımında 817 ppm tespit edilirken E5B1 yakıtı kullanımında %10'dan fazla azalma ile 724 ppm olurken E10B2 yakıtı kullanımında %12'den fazla azalma ile 709 ppm olarak görülmüştür.

## **5.2. Öneriler**

Fosil kökenli yakıtlarla karışım potansiyeli yüksek olan alkol yakıtlardan olan etanol ile karışım oluşturularak ve faz ayrışımının engellenmesini sağlamak için 2-bütanol eklenmesiyle bir dizel motorda, enjeksiyon başlangıç zamanının ve pilot enjeksiyon uygulamalarının yanma ve emisyon karakteristikleri üzerine etkisi araştırılmıştır.

Etanol-dizel yakıt karışımlarındaki faz ayrışımının önlenmesini sağlamak için optimum katkı maddesi ilavesi sonrasında, motor performans ve yanma değerlerindeki değişimlerin inceleneceği araştırmalara ihtiyaç vardır. Ayrıca motorlar uzun süre karışım yakıtları ile çalıştırılarak enjektörler üzerine etkisi incelenmelidir.

Karışım yakıtlarının kullanımı ile değişik enjeksiyon başlangıç zamanları, değişik enjeksiyon basınçları ve değişik pilot enjeksiyon uygulamaları üzerine araştırma yapılması motor performans ve yanma karakteristiklerinde optimum sonuçların alınmasında yol göstereceği önemli bir gerçektir.



## KAYNAKLAR

- [1] IEA (2020), World Energy Balances: Overview, <https://www.iea.org/reports/world-energy-balances-overview> ,(Ziyaret Tarihi: 24 Ağustos 2020).
- [2] IEA (2020), World Energy Balances: Overview, *Statistics report*, 8-9.
- [3] IEA (2020), World Energy Balances: Key, *Energy statistics*, <https://www.iea.org/world> (Ziyaret Tarihi: 23 Ağustos 2020).
- [4] IEA (2020), World Energy Balances: Overview, *Statistics report*, 15.
- [5] IEA (2020), World Energy Balances: Overview, *Statistics report*, 28.
- [6] Breathlife, <https://breathelife2030.org/the-issue/who-it-affects/>, (Ziyaret Tarihi: 23 Ağustos 2020).
- [7] World Health Organization, WHO Global Ambient Air Quality Database, <https://www.who.int/airpollution/data/cities/en/>, (Ziyaret Tarihi: 23 Ağustos 2020).
- [8] Breathlife, <https://breathelife2030.org/the-issue/air-quality-in-your-city/#see-full-data>, (Ziyaret Tarihi: 23 Ağustos 2020).
- [9] Breathlife, [https://breathelife2030.org/city\\_data/istanbul/](https://breathelife2030.org/city_data/istanbul/), (Ziyaret Tarihi: 23 Ağustos 2020).
- [10] Türkiye Cumhuriyeti Çevre ve Şehircilik Bakanlığı (2020) Sözleşme ve Protokoller-Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi-Viyana Sözleşmesi, <https://iklim.csb.gov.tr/viyana-sozlesmesi-i-4399>, (Ziyaret Tarihi: 21 Ağustos 2020).
- [11] Türkiye Cumhuriyeti Çevre ve Şehircilik Bakanlığı (2020) Sözleşme ve Protokoller-Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi-Montreal Sözleşmesi, <https://iklim.csb.gov.tr/montreal-protokolu-i-4364>, (Ziyaret Tarihi: 21 Ağustos 2020).
- [12] Türkiye Cumhuriyeti Çevre ve Şehircilik Bakanlığı (2020) Sözleşme ve Protokoller-Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi-Kyoto Protokolü, <https://iklim.csb.gov.tr/kyoto-protokolu-i-4363>, (Ziyaret Tarihi: 21 Ağustos 2020).
- [13] Türkiye Cumhuriyeti Çevre ve Şehircilik Bakanlığı (2020) Sözleşme ve Protokoller-Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi-Paris Anlaşması, <https://iklim.csb.gov.tr/paris-anlasmasi-i-98587>, (Ziyaret Tarihi: 21 Ağustos 2020).

- [14] IEA (2020), World Energy Balances: *Key Energy Statistics*, <https://www.iea.org/countries/turkey>, (Ziyaret Tarihi: 23 Ağustos 2020).
- [15] IEA (2016), *Energy Policies of IEA Countries: Turkey 2016 Review*, IEA, Paris <https://www.iea.org/reports/energy-policies-of-iea-countries-turkey-2016-review>, (Ziyaret Tarihi: 21 Ağustos 2020).
- [16] Türkiye Cumhuriyeti Dışişleri Bakanlığı (2020) Türkiye'nin Enerji Profili ve Stratejisi, [http://www.mfa.gov.tr/turkiye\\_nin-enerji-stratejisi.tr.mfa](http://www.mfa.gov.tr/turkiye_nin-enerji-stratejisi.tr.mfa), (Ziyaret Tarihi: 21 Ağustos 2020).
- [17] Gizlenci Ş., Samsun M. A., Enerji Bitkileri ve Biyoyakıtlar Sektörel Rapor, *T.C. Tarım ve Köyişleri Bakanlığı Araştırma Enstitüsü Müdürlüğü Enerji Bitkileri Tarımı ve Biyoyakıtlar (Biyomotorin, Biyoetanoli Biyomas)*, 2008.
- [18] Kızılaslan N., Ünal T., Türkiye ve Avrupa Birliği'nde Biyoyakıt, *Türk Tarım ve Doğa Bilimleri Dergisi*, 2015, **2**(1), 26-33.
- [19] Onurbaş Avcıoğlu A., Türker U., Atasoy Z., Koçtürk D., *Tarımsal Kökenli Yenilenebilir Enerjiler-Biyoyakıtlar*, Nobel Yayınevi, Ankara, 2011.
- [20] Çelebi Y., Aydın H., An overview on the light alcohol fuels in diesel engines, *Fuel*, 2019, **236**, 890-911.
- [21] Balat M., Balat H., Öz C., Progress in Bioethanol Processing, *Progress in Energy and Combustion Science*, 2008, **34**(5), 551-573.
- [22] Hansen A. C., Zhang Q., Lyne P. W. L., Ethanol-diesel fuel blends- a review, *Bioresource Technology*, 2005, **96**(3), 277-285.
- [23] Yusri I. M., Mamat R., Najafi G., Razman A., Awad O. I., Azmi W.H., Ishak W.F.W., Shaiful A. I M, Reviews Alcohol based automotive fuels from first four alcohol family in compression and spark ignition engine: A review on engine performance and exhaust emissions, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, **77**, 169-181, DOI: 10.1016/j.rser.2017.03.080.
- [24] Emiroğlu A. O., Şen M., Combustion, performance and emission characteristics of various alcohol blends in a single cylinder diesel, *Fuel*, 2018, **212**, 34-40.
- [25] Gopinath S., Devan P. K., Mohan C., Krishnarao L. R., Lokeshkumar P., Prasad S. V., A review on influence of injection timing and injection pressure on DI diesel engine fuelled with low viscous fuel, *Materials Today: Proceedings*, DOI: 10.1016/j.matpr.2020.04.070.
- [26] Raeie N., Emami S. ve Sadaghiyani O. K., Effects of injection timing, before and after top dead center on the propulsion and power in a diesel engine, *Propulsion and Power Research*, 2014, **3**(2), 59-67, DOI: 10.1016/j.jprr.2014.06.001.

- [27] Guedes A. D. M., Braga S. L., Pradelle F., Performance and combustion characteristics of a compression ignition engine running on diesel-biodiesel-ethanol (DBE) blends – Part 2: Optimization of injection timing, *Fuel*, 2018, **225**, 174-183.
- [28] Uyumaz A., Solmaz H., Boz F., Yılmaz E., Aydoğan B. ve Yücesu H. S., RCCI Bir Motorda Enjeksiyon Zamanlamasına Bağlı Yanma ve Motor Performans Karakteristikleri, *International Congress of the New Approaches and Technologies for Sustainable Development*, Isparta, Turkey, 60-69, September 21-24 2017.
- [29] Ahmed S. A., Zhou S., Zhu Y., Feng Y., Malik A. ve Ahmad N., Influence of Injection Timing on Performance and Exhaust Emission of CI Engine Fuelled with Butanol-Diesel Using a 1D GT-Power Model, *Processes*, 2019, **7**(5), DOI: 10.3390/pr7050299.
- [30] Seyfi P. (2011), Dizel Motorlar, <http://web.hitit.edu.tr/dosyalar/materyaller/hicriyavuz@hititedutr100220179U6G8Q9S.pdf>, (Ziyaret Tarihi: 24 Ağustos 2020).
- [31] [http://www.esru.strath.ac.uk/EandE/Web\\_sites/02-03/biofuels/what\\_bioethanol.htm](http://www.esru.strath.ac.uk/EandE/Web_sites/02-03/biofuels/what_bioethanol.htm) (Ziyaret Tarihi: 26 Ağustos 2020).
- [32] RFA (Renewable Fuels Association), <https://ethanolrfa.org/statistics/annual-ethanol-production/>, (Ziyaret Tarihi: 29 Ağustos 2020).
- [33] Hatunoğlu E. E., Biyoyakıt Politikalarının Tarım Sektörüne Etkileri, Devlet Planlama Teşkilatı Uzmanlık Tezleri, Ankara, 2010, 2814.
- [34] Akalın B., Seyrekbasan A. M., Dünyadaki Biyoetanol Politikalarının Türkiye Koşulları ile Karşılaştırmalı İncelenmesi ve Türkiye Şartlarına Uygunluk Açısından Biyoetanol Üretiminde Kullanılan Hammaddelerin Değerlendirilmesi, *U. Ü. Ziraat Fakültesi Dergisi*, 2015, **29**(1), 157-168.
- [35] T.C. Tarım ve Orman Bakanlığı Tütün ve Alkol Dairesi Başkanlığı, Resmi İstatistikler, <https://www.tarimorman.gov.tr/TADB/Link/38/Resmi-Istatistikler>, (Ziyaret Tarihi: 29 Ağustos 2020).
- [36] UYM (Ulaşım Yönetim Merkezi), Haberler ve Duyurular, <https://uym.ibb.gov.tr/kurumsal/haberler-ve-duyurular/t%C3%BCik-motorlu-kara-ta%C5%9F%C4%B1tlar%C4%B1-may%C4%B1s-2019-raporunu-yay%C4%B1nlad%C4%B1>, (Ziyaret Tarihi: 30 Ağustos 2020).
- [37] PETDER (Petrol Sanayi Derneği), <http://www.petder.org.tr/Uploads/Document/7b886e84-a89f-403b-a510-32fcb202f3dd.pdf?v=637332621912723005>, (Ziyaret Tarihi: 30 Ağustos 2020).
- [38] Murcak A., Haşimoğlu C., Çevik İ., Kahraman H., Effect of injection timing to performance of a diesel engine fuelled with different diesel-ethanol mixtures, *Fuel*, 2015, **153**, 569–577, DOI: 10.1016/j.fuel.2015.03.028.

- [39] Li G., Lee T. H., Liu Z., Lee C. F., Zhang C., Effects of injection strategies on combustion and emission characteristics of a common-rail diesel engine fueled with isopropanol-butanol-ethanol and diesel Blends, *Renewable Energy*, 2018, **130**, 677-686, DOI: 10.1016/j.renene.2018.06.099.
- [40] Liu J., Wang F., Li S., The Effects of EGR and Injection Timing on the Engine Combustion and Particulate Matter Emission Performances Fuelled with Diesel-Ethanol Blends, *Thermal Science*, 2018, **22**(3), 1457-1467, DOI: 10.2298/TSCI171119011L.
- [41] Sayin C., Uslu K., Canakci M., Influence of injection timing on the exhaust emissions of a dual-fuel CI engine, *Renewable Energy*, 2018, **33**(6), 1314-1323.
- [42] Tutak W., Jamrozik A., Berezky A., Lukacs K., Effects of Injection Timing of Diesel Fuel on Performance and Emission of Dual Fuel Diesel Engine Powered by Diesel/ E85, *Transport*, 2018, **33**(3), 633-646.
- [43] Emiroğlu A. O., Şen M., Combustion, performance and emission characteristics of various alcohol blends in a single cylinder diesel engine, *Fuel*, 2018, **212**, 34-40, DOI: 10.1016/j.fuel.2017.10.016.
- [44] Prabakaran B., Vijayabalan P., and Balachandar M., Experimental Investigation of Ethanol-Diesel-Butanol Blends in a Compression Ignition Engine by Modifying the Operating Parameters, *SAE Int. J. Engines*, 2018, **11**(5), 547-556, DOI: 10.4271/03-11-05-0037.
- [45] Park S. H., Youn I. M., Lee C. S., Influence of ethanol blends on the combustion performance and exhaust emission characteristics of a four-cylinder diesel engine at various engine loads and injection timings, *Fuel*, 2011, **90**(2), 748-755, DOI: 10.1016/j.fuel.2010.08.029.
- [46] Sayin C., Canakci M., Effects of injection timing on the engine performance and exhaust emissions of a dual-fuel diesel engine, *Energy Conversion and Management*, 2009, **50**(1), 203-213, DOI: 10.1016/j.enconman.2008.06.007.
- [47] He B. Q., Shuai S. J., Wang J. X., He H., The effect of ethanol blended diesel fuels on emissions from a diesel engine, *Atmospheric Environment*, 2003, **37**(35), 4965-4971, DOI: 10.1016/j.atmosenv.2003.08.029.
- [48] Hulwan D. B., Joshi S. V., Performance, emission and combustion characteristic of a multicylinder DI diesel engine running on diesel-ethanol-biodiesel blends of high ethanol content, *Applied Energy*, 2011, **88**(12), 5042-5055, DOI: 10.1016/j.apenergy.2011.07.008.
- [49] Park S. H., Cha J., Lee C. S., Effects of Bioethanol-Blended Diesel Fuel on Combustion and Emission Reduction Characteristics in a Direct-Injection Diesel Engine with Exhaust Gas Recirculation (EGR), *Energy Fuels*, 2010, **24**(7), 3872-3883, DOI: 10.1021/ef100233b.

- [50] Xing-cai L., Jian-guang Y., Wu-gao Z., Zhen H., Effect of cetane number improver on heat release rate and emissions of high speed diesel engine fueled with ethanol–diesel blend fuel, *Fuel*, 2004, **83**(14-15), 2013-2020, DOI: 10.1016/j.fuel.2004.05.003.
- [51] Yan Y., Yu-sheng Z., Si-ping R., Rui Z., Dong-dong W., Study on Combustion and Emission Characteristics of Diesel Engines Fueled with Ethanol/Diesel Blended Fuel, *SAE Technical Paper Series*, DOI: 10.4271/2009-01-2675.
- [52] Gawale G. R., Srinivasulu G. N., Experimental investigation of ethanol/diesel and ethanol/biodiesel on dual fuel mode HCCI engine for different engine load conditions, *Fuel*, DOI: 10.1016/j.fuel.2019.116725.
- [53] Alptekin E., Emission, injection and combustion characteristics of biodiesel and oxygenated fuel blends in a common rail diesel engine, *Energy*, 2017, **119**, 44-52, DOI: 10.1016/j.energy.2016.12.069.
- [54] Alptekin E., Evaluation of ethanol and isopropanol as additives with diesel fuel in a CRDI diesel engine, *Fuel*, 2017, **205**, 161-172, DOI: 10.1016/j.fuel.2017.05.076.
- [55] Murcak A., Haşimoğlu C., Çevik İ., Karabektaş M., Ergen G., Effects of ethanol–diesel blends to performance of a DI diesel engine for different injection timings, *Fuel*, 2013, **109**, 582-587, DOI: 10.1016/j.fuel.2013.03.014.
- [56] Rosa J. S., Martins M. E. S., Telli G. D., Altafini C. R., Wander P. R., Rocha L. A. O., Exploring the effects of diesel start of injection and water-in-ethanol concentration on a reactivity controlled compression ignition engine, *Fuel*, 2020, **281**, DOI: 10.1016/j.fuel.2020.118751.
- [57] Qi D. H., Yang K., Zhang D., Chen B., Combustion and emission characteristics of diesel-tung oil-ethanol blended fuels used in a CRDI diesel engine with different injection strategies, *Applied Thermal Engineering*, 2016, **111**, 927-935, DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2016.09.157.
- [58] Gao T., Yu S., Li T., Zheng M., Impacts of multiple pilot diesel injections on the premixed combustion of ethanol fuel, *Journal of Automobile Engineering*, 2017, **232**(6), 738-754, DOI: 10.1177/0954407017706858.
- [59] Burnete N. V., Separate Direct Injection of Diesel and Ethanol A Numerical Analysis, *Thermal Science*, 2017, **21**(1), 451-463, DOI: 10.2298/TSCI160824274B.
- [60] Mohammadi A., Ishiyama T., Kakuta T., Kee S. S., Fuel Injection Strategy for Clean Diesel Engine Using Ethanol Blended Diesel Fuel, *SAE World Congress*, Michigan, U.S.A, 11-14 April 2005.
- [61] Park S. H., Youn I. M., Lee C. S., Influence of two-stage injection and exhaust gas recirculation on the emissions reduction in an ethanol-blended diesel-fueled four-cylinder diesel engine, *Fuel Processing Technology*, 2010, **91**(11), 1753-1760, DOI: 10.1016/j.fuproc.2010.07.016.

- [62] Han J., Somers L. M. T., Cracknell R., Joedicke A., Wardle R., Mohan V. R. R., Experimental investigation of ethanol/diesel dual-fuel combustion in a heavy-duty diesel engine, *Fuel*, 2020, **275**, DOI: 10.1016/j.fuel.2020.117867.
- [63] Jamrozik A., The effect of the alcohol content in the fuel mixture on the performance and emissions of a direct injection diesel engine fueled with dieselmethanol and diesel-ethanol blends, *Energy Conversion and Management*, 2017, **148**, 461-476, DOI: 10.1016/j.enconman.2017.06.030.
- [64] Aydogan H., Performance, emission and combustion characteristics of bioethanol-biodiesel-diesel fuel blends used in a common rail diesel engine, *Isi Bilimi ve Tekniği Dergisi*, 2015, **35**(2), 19-27.
- [65] Kaiadi M., Johansson B., Lundgren M., Experimental Investigation on different Injection Strategies for Ethanol Partially Premixed Combustion, *SAE International*, DOI: 10.4271/2013-01-0281.
- [66] Li W., Ren Y., Wang X-B., Miao H., Jiang D-M., Huang Z-H., Combustion characteristics of a compression ignition engine fuelled with diesel-ethanol blends, *J. Automobile Engineering*, 2008, **222**(2), 265-274, DOI: 10.1243/09544070JAUTO496.
- [67] Sayin C., Uslu K., Influence of advanced injection timing on the performance and emissions of CI engine fueled with ethanol-blended diesel fuel, *International Journal Of Energy Research*, 2008, **32**(11), 1006-1015, DOI: 10.1002/er.1409.
- [68] Huang J., Wang Y., Li S., Roskilly A. P., Yu H., Li H., Experimental investigation on the performance and emissions of a diesel engine fuelled with ethanol-diesel blends, *Applied Thermal Engineering*, 2009, **29**(11-12), 2484-2490, DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2008.12.016.
- [69] Rousseau S., Lemoult B., Tazerout M., Combustion characterization of natural gas in lean burn spark-ignition engine, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: *Journal of Automobile Engineering*, 1999, **213**(5), 481-489, DOI: 10.1243/0954407991527044.
- [70] Borman G., Nishiwaki K., Internal combustion engine heat transfer, *Prog. in Energy and Combust. Sci.*, 1987, **13**(1), 1-46.
- [71] Brunt M. F. J., Platts K. C., Calculation of Heat Release in Direct Injection Diesel Engines, *SAE International Congress and Exposition*, Michigan, U.S.A, 1-4 March 1999.

## KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER

- [1] **Vargün M.**, Hürpekli M., Özsezen A. N., Etanol-Motorin Karışımlarının Kullanıldığı Bir Dizel Motorda Yakıt Püskürtme Zamanının Yanma Karakterleri Üzerine Etkisi, *Proceedings of INCOS2020*, Kayseri, Türkiye, 5-7 Haziran 2020.
- [2] Hürpekli M., **Vargün M.**, Özsezen A. N., Apaydın A.H., Investigation of combustion of diesel-ethanol fuel blend in compression ignition engine, *Proceedings of INCOS2020*, Kayseri, Türkiye, 5-7 Haziran 2020.



## ÖZGEÇMİŞ

Mustafa Vargün, liseyi 2008-2012 yılları arasında Güllübağlar İ.M.K.B Teknik ve Endüstri Meslek Lisesinde okudu. 2012 yılında Kocaeli Üniversitesi'nde Otomotiv Mühendisliği Bölümü'nde lisans eğitimine başladı ve bu bölümden 2017 yılında lisans derecesi aldı. 2017 Ekim'de Londra'ya giderek 1 yıl dil eğitimi aldı. Şubat 2019'da Kocaeli Üniversitesi'nde Otomotiv Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans eğitimine başlandı. Şubat 2021'de Yüksek Lisans Eğitimini tamamladı.

