

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

OTOMOTİV MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**COMMON RAIL DİREKT ENJEKSİYONLU BİR DİZEL
MOTORDA MOTORİN - FUZEL YAĞI KARIŞIMININ MOTOR
KARAKTERİSTİKLERİNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

BİROL ÖZGÜN

KOCAELİ 2021

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**OTOMOTİV MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**COMMON RAIL DİREKT ENJEKSİYONLU BİR DİZEL
MOTORDA MOTORİN - FUZEL YAĞI KARIŞIMININ MOTOR
KARAKTERİSTİKLERİNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

BİROL ÖZGÜN

**Doç.Dr. Ertan ALPTEKİN
Danışman, Kocaeli Üniv.**

.....

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

.....

**Doç.Dr. Hüseyin ŞANLI
Jüri Üyesi, Tekirdağ Namık Kemal Üniv.**

.....

Tezin Savunulduğu Tarih: 05.02.2021

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Sürekli olarak artış eğiliminde olan dünya nüfusu, motorlu araç sayısı ve fosil yakıt tüketiminin bir sonucu olarak artan egzoz emisyon salınımı, insan ve çevre sağlığını tehdit eden boyutlara ulaşmaktadır. Uluslararası anlaşmalar ile egzoz emisyonu limit değerlerinin sürekli olarak düşürülmesinin ve enerjide dışa bağımlılığı azaltma talebinin bir sonucu olarak, araştırmacılar daha temiz enerji arayışı içine girmiş ve buna bağlı olarak içten yanmalı motorlarda alternatif yakıtların kullanıldığı çalışmalar son yıllarda hız kazanmıştır. Bu tez çalışmasında da; ortak ray (common-rail) direkt enjeksiyon sistemine sahip bir dizel motorda yüksek oksijen içerikli fuzel yağının katkı maddesi olarak kullanılabilirliği, yanma, performans ve emisyon parametreleri üzerindeki etkileri deneysel olarak incelenmiştir.

Eğitim ve çalışma hayatım boyunca desteklerini esirgemeyen, bu alanda çalışma fırsatı veren, çalışma sürecinde tecrübe, fikir ve görüşleri ile beni yönlendiren saygıdeğer hocam ve danışmanım Doç.Dr. Ertan ALPTEKİN'e teşekkürlerimi sunarım. Çalışmalarım boyunca destek ve katkıları için saygıdeğer Doç.Dr. Ali TÜRKCAN hocama teşekkür ederim. Tüm hayatım boyunca yanımda olarak desteğini esirgemeyen aileme ve yol arkadaşşıma sonsuz teşekkür ederim. Ayrıca test çalışmasında kullanılan fuzel yağının teminini sağlayan Konya Şeker Sanayi ve Ticaret A.Ş. yönetimine teşekkür ederim.

Şubat - 2021

Birol ÖZGÜN

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR	ii
İÇİNDEKİLER	ii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	iii
TABLOLAR DİZİNİ	iv
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	v
ÖZET.....	vi
ABSTRACT	vii
GİRİŞ	1
1. GENEL BİLGİLER	3
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	9
3. ALTERNATİF YAKIT OLARAK FUZEL YAĞI	16
3.1. İçten Yanmalı Motorlarda Kullanılan Alternatif Yakıtlar.....	16
3.2. Fuzel Yağı	17
3.3. Fuzel Yağının Elde Edilişi	18
3.4. Fuzel Yağının Kullanım Alanları	19
4. MATERYAL VE METOT	21
4.1. Test Yakıtları	21
4.2. Motor Test Düzenegi ve Ölçüm Sistemleri.....	22
4.2.1. Test motoru	22
4.2.2. Test düzenegi ve ölçüm sistemleri.....	23
4.3 Hesaplanan Değerler ve Analiz Metodolojisi.....	28
4.3.1. Özgül yakıt tüketimi	28
4.3.2. Motor momenti	29
4.3.3. Efektif güç.....	29
4.3.4. Isı dağılım analizi.....	30
5. BULGULAR VE TARTIŞMA	33
5.1. Özgül Yakıt Tüketimi.....	33
5.2. Enjeksiyon ve Yanma Sonuçları	34
5.2.1. Yakıt hat basıncı	34
5.2.2. Enjeksiyon stratejisi	35
5.2.3. Yanma karakteristiği.....	39
5.3. Egzoz Emisyonları	42
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	46
KAYNAKLAR	48
KİŞİSEL YAYINLAR VE ESERLER	52
ÖZGEÇMİŞ	53

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1.	Dünyada birincil enerji tüketimi	3
Şekil 1.2.	Türkiyede birincil enerji tüketimi	4
Şekil 1.3.	Dünya petrol rezerv miktarı ve rezerv ömrü.....	5
Şekil 1.4.	Dünya üzerindeki araç sayısı	6
Şekil 1.5	Türkiye’deki yakıt cinsine göre otomobil dağılımı	7
Şekil 3.1.	Fuzel yağının elde edilişi	19
Şekil 4.1.	F10 test yakıtı.....	21
Şekil 4.2.	Test motoru	23
Şekil 4.3.	Test sistemi şematik görünümü	23
Şekil 4.4.	Hidrolik dinamometre	24
Şekil 4.5.	Dinamometre kontrol ünitesi	25
Şekil 4.6.	Hassas terazi ve yakıt eşanjörü	25
Şekil 4.7.	Egzoz emisyon ölçüm cihazı	26
Şekil 4.8.	Hava debisi ölçüm cihazı	26
Şekil 4.9.	Yanma ölçüm sistemi.....	27
Şekil 4.10.	Açısal enkoder	27
Şekil 4.11.	Ölçüm ekipmanları a) silindir basınç sensörü b) hat basınç sensörü c) akım kelepçesi	28
Şekil 4.12.	Motor moment ölçüm şematifi	29
Şekil 4.13.	Örnek silindir içi basınç ve ısı dağılım grafiği	31
Şekil 4.14.	Örnek yakıt hat basıncı ve enjeksiyon sinyali grafiği.....	32
Şekil 5.1.	ÖYT değerlerinin karşılaştırması.....	34
Şekil 5.2.	OYHB değerlerinin karşılaştırması.....	35
Şekil 5.3.	PEB değeri karşılaştırması.....	36
Şekil 5.4.	PES değerlerinin karşılaştırması	37
Şekil 5.5.	Pilot enjeksiyon süresi karşılaştırması	37
Şekil 5.6.	Pilot enjeksiyon süresi karşılaştırması	37
Şekil 5.7.	AEB değeri karşılaştırması.....	38
Şekil 5.8.	AES değeri karşılaştırması.....	38
Şekil 5.9.	Ana enjeksiyon süresi karşılaştırması	38
Şekil 5.10.	Ana enjeksiyon süresi karşılaştırması	39
Şekil 5.11.	Silindir basınç ve ısı dağılımı karşılaştırması	41
Şekil 5.12.	Tutuşma gecikmesi karşılaştırması	42
Şekil 5.13.	Egzoz emisyonlarının karşılaştırılması	43
Şekil 5.14.	Maksimum silindir basınç karşılaştırması	45

TABLULAR DİZİNİ

Tablo 1.1. EU emisyon standartları	8
Tablo 3.1. Fuzel yağı bileşenleri ve genel özellikleri	18
Tablo 4.1. Test yakıt özellikleri	22
Tablo 4.2. Test motoru özellikleri.....	22
Tablo 4.3. Hidrolik dinamometre özellikleri.....	24
Tablo 4.4. Emisyon cihazı ölçüm hassasiyeti	26
Tablo 5.1. Enjeksiyon ve yanma sonuçları	42
Tablo 5.2. Hava tüketim değeri karşılaştırması	44



SİMGELER VE KISALTMALAR

m_y	: Yakıt debisi
F	: Kuvvet
Md	: Motor momenti
n	: Motor hızı
Nm	: Newton metre
P	: Basınç
Pe	: Efektif güç
Qg	: Motora sürülen enerji miktarı
Qn	: Net ısı dağılımı
Qt	: Toplam ısı dağılımı
U	: İç enerji
V	: Hacim
η_t	: Efektif verim
λ	: Hava fazlalık katsayısı
π	: Pi sayısı
ω	: Açısal hız
l	: Uzaklık

Kısaltmalar

AEB	: Ana Enjeksiyon Başlangıcı
AES	: Ana Enjeksiyon Sonu
CO	: Karbonmonoksit
CRDI	: Common Rail Direct Injection (Ortay-Ray Direkt Enjeksiyon)
EU	: European Union (Avrupa Birliği)
F10	: % 10 Fuzel Yağı - %90 Motorin
IMEP	: Indicated Mean Effective Pressure (İndike Ortalama Efektif Basınç)
İYM	: İçten Yanmalı Motor
KA	: Krank Açısı
MIDO	: Maksimum Isı Dağılım Oranı
MSB	: Maksimum Silindir Basıncı
NOx	: Azot Oksitler
OYHB	: Ortalama Yakıt Hat Basıncı
ÖYT	: Özgül Yakıt Tüketimi
PEB	: Pilot Enjeksiyon Başlangıcı
PES	: Pilot Enjeksiyon Sonu
THC	: Toplam Hidrokarbon
TÜİK	: Türkiye İstatistik Kurumu
ÜÖN	: Üst Ölü Nokta
ÜÖNÖ	: Üst Ölü Noktadan Önce
ÜÖNS	: Üst Ölü Noktadan Sonra

COMMON RAIL DİREKT ENJEKSİYONLU BİR DİZEL MOTORDA MOTORİN-FUZEL YAĞI KARIŞIMININ MOTOR KARAKTERİSTİKLERİNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ

ÖZET

Fuzel yağı, şeker pancarından şeker üretim prosesinde bir yan ürün olarak oluşan melastan etil alkol üretilmesi sırasında ortaya çıkan atık bir üründür ve dizel motorlarda kullanılabilir alternatif yakıtlardan bir tanesidir. Yapılan bu çalışmada, ortak ray (common-rail, CRDI) direkt yakıt enjeksiyon sistemine sahip bir dizel motorda motorin ve fuzel yağı-motorin (%90 motorin - %10 fuzel yağı, F10) karışımı yakıt olarak kullanılmış ve bu yakıtların performans, enjeksiyon, yanma ve emisyon karakteristikleri analiz edilmiştir. Testler 1500, 1800 ve 2100 dev/dk motor hızlarında ve ortalama motor yükünde (125 Nm) gerçekleştirilmiştir. Tüm devir şartlarında, F10 yakıtının özgül yakıt tüketimi motorine kıyasla daha yüksekken, silindir içi basınç değerleri ise daha düşüktür. Motor devri artışı ile birlikte F10 yakıtının silindir içi basınç değerleri motorine yaklaşmıştır. Ana ve pilot enjeksiyon karakteristiği, tutuşma gecikmesi ve yanmış yakıt kesri değerleri özellikle 1500 ve 1800 dev/dk'da önemli ölçüde farklılıklar göstermiştir. Her iki yakıtın maksimum ısı dağılım oranlarının ve krank açısına göre konumlarının birbirine yakın olduğu gözlemlenmiştir. Emisyon sonuçlarına göre; tüm devir şartlarında F10 yakıtının kullanımı motorine kıyasla NOx ve CO emisyonlarında azalma sağlarken, THC emisyonlarında ise bir miktar artışa neden olmuştur.

Anahtar Kelimeler: CRDI, Dizel Motor, Emisyon, Fuzel Yağı, Performans.

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF DIESEL - FUSEL OIL MIXTURE ON ENGINE CHARACTERISTICS IN A COMMON RAIL DIRECT INJECTION DIESEL ENGINE

ABSTRACT

Fusel oil is a waste product procured during the production of ethyl alcohol from molasses which is a by-product obtained during sugar production from sugar beet and it is one of the alternative fuels that can be used in diesel engines. In the presented study, diesel fuel and fusel oil-diesel fuel mixture (90% diesel - 10% fusel oil, F10) were used as the test fuels in a diesel engine with a common-rail fuel injection system (CRDI) and performance, injection, combustion, and emission characteristics of these fuels were analyzed. The tests were carried out at 1500, 1800, and 2100 rpm engine speeds and medium engine load (125 Nm). In all engine test conditions, specific fuel consumption values of F10 fuel were higher than those of diesel fuel whereas in-cylinder pressure values of diesel fuel were higher than those of F10 fuel. The in-cylinder pressure values of F10 fuel became closer to those of pure diesel fuel with an increase in engine speed. Main and pilot injection characteristics, ignition delay, and mass burned fraction values showed significant differences especially at 1500 and 1800 rpm engine speeds. It was observed that the maximum heat release rate values of both fuels and their corresponding crank angle positions were close to each other. According to the emission results, F10 fuel caused a decrease in NO_x and CO emissions, while it caused an increase in THC emissions in all test conditions.

Keywords: CRDI, Diesel Engine, Emission, Fusel Oil, Performance.

GİRİŞ

Dünyada fosil yakıt rezervinin sınırlı olması ve daha yaşanabilir bir çevreye olan ihtiyaca dair farkındalık düzeyinin artması sonucunda, içten yanmalı motorlarda kullanılabilir alternatif yakıt arayışı gün geçtikçe hızlanmaktadır. Günümüz şartları, dışa bağımlılığının azaltılması ve petrol krizlerinden etkilenmemek için önlemlerin alınması gerektiğini göstermektedir. Bununla birlikte, uluslararası örgütlerin çevresel iyileştirmeler gereği uyguladığı standartlar her geçen gün daha kısıtlayıcı olmaya devam etmektedir. Mevcut durum ve buna bağlı olarak öngörülebilir gelecek düşünüldüğünde, fosil yakıtlara alternatif olarak kullanılması planlanan yakıtların daha çevreci ve emisyon standartlarına uyum konusunda araç üreticilerine fayda sağlayabilecek durumda olması beklenmektedir. Günümüzde, ulaşım sektöründe çeşitli alkoller (etil alkol, metil alkol) fosil yakıtlara belirli oranlarda ilave edilerek kullanılabilir.

Bu yüksek lisans tez çalışmasında, dizel ortak ray (common-rail) direkt yakıt enjeksiyon sistemine sahip bir motorda, araçların en sık kullanıldığı devir aralıkları göz önüne alınarak, 1500, 1800 ve 2100 dev/dk motor hızlarında ve yaklaşık olarak motorun maksimum torkunun yarısına denk gelen 125 Nm motor yükünde motor testleri gerçekleştirilmiştir. Saf motorin ve %10 fuzel yağı-%90 motorin (F10) içeren test yakıtları ile yukarıda belirtilen şartlarda motor testleri yapılmış ve motorun performans, yanma, enjeksiyon ve egzoz emisyon karakteristikleri incelenerek iki yakıt birbiri ile karşılaştırılmıştır. Alkol üretimi sırasında yan ürün olarak ortaya çıkan fuzel yağının CRDI bir motorda yakıt olarak kullanılabilirliğinin araştırılması, hem yakıt olarak dışa bağımlılık hem de çevre için önem arz etmektedir. Literatür incelendiğinde, fuzel yağı ile ilgili yapılan çalışmaların oldukça kısıtlı olduğu görülmektedir. Bu yüksek lisans tez çalışmasıyla birlikte literatürdeki bu eksikliğin giderilmesi amaçlanmaktadır.

Bu tezde, yapılan çalışmalar 6 bölümde sunulmuştur. Birinci bölümde, fosil yakıtların rezerv durumu, alternatif yakıtlara olan ihtiyacın gerekçeleri, uluslararası emisyon standartları ve fuzel yağı hakkında genel bilgilere yer verilmiştir.

İkinci bölümde, fuzel yağının yakıt olarak kullanıldığı ve buna bağlı olarak motor performans, yanma ve egzoz emisyonlarını araştıran literatürdeki deneysel çalışmalar incelenmiştir.

Üçüncü bölümde, fuzel yağının üretimi, kullanım alanları ve özellikleri hakkında bilgi verilmiştir.

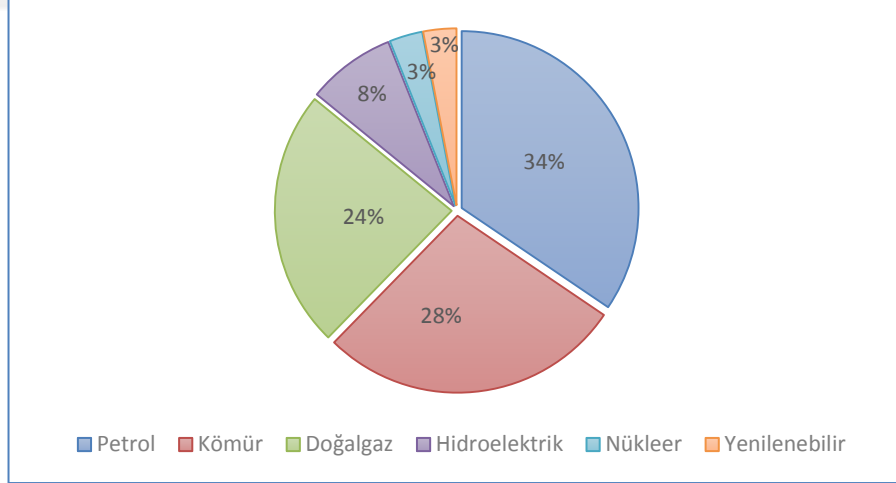
Dördüncü bölümde, testlerde kullanılan ekipmanlar, ölçüm sistemleri ve özellikleri, test yakıtları ve test şartları hakkında detaylar verilmiştir.

Beşinci bölümde, gerçekleştirilen testler sonrasında elde edilen motor performans, yanma, enjeksiyon ve emisyon karakteristikleri ve diğer bulgular değerlendirilmiştir.

Altıncı bölümde ise testler ve test sonrasında yapılan değerlendirmeler özetlenerek sonuçlandırılmıştır. Bunun yanında, ilgili eksiklikler ve gelecekte yapılacak çalışmalar hakkında bilgi verilmiştir.

1. GENEL BİLGİLER

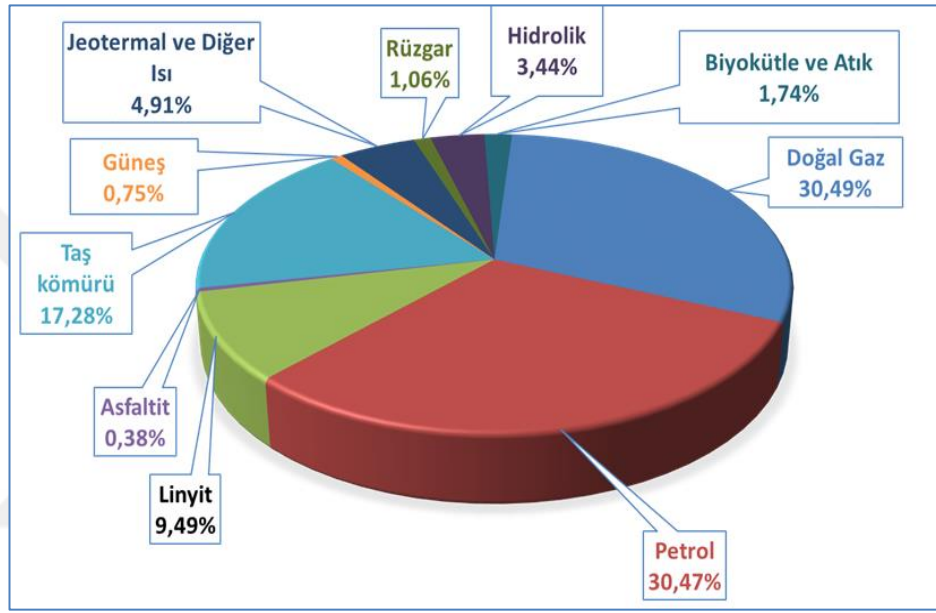
Enerji, ülkelerdeki ekonomik büyüme ve sosyal gelişim için en önemli ve devamlılık gerektiren gereksinimlerin başında gelmektedir. Enerji güvenliği, ülkelerin enerji ihtiyacında dışa bağımlılığının azaltılması, ekonomik büyümesi ve sosyal gelişimi için gerekli unsurlardan biridir. Enerji, hayatın devamlılığı için gerekli olan ve insan hayatını etkileyen tüm proseslerin vazgeçilmez bir girdisi olmakla birlikte ülkelerin uluslararası ilişkilerini etkileyebilecek en önemli parametrelerden biridir. Enerji, dünyada ve ülkemizde sanayi, konut, ulaştırma ve hizmet gibi sektörlerde kullanılmaktadır. Dünyada yenilenebilir enerjiye olan ilginin artmasına rağmen enerji ihtiyacının %86'sı petrol, doğalgaz ve kömür gibi fosil enerji kaynaklarından karşılanmaktadır. Şekil 1.1'de gösterildiği gibi, dünya birincil enerji tüketimi içindeki en büyük pay %34,2'lik bir oran ile ulaşım sektörünün esas enerji kaynağı olan petrole aittir [1].



Şekil 1.1. Dünya'da birincil enerji tüketimi

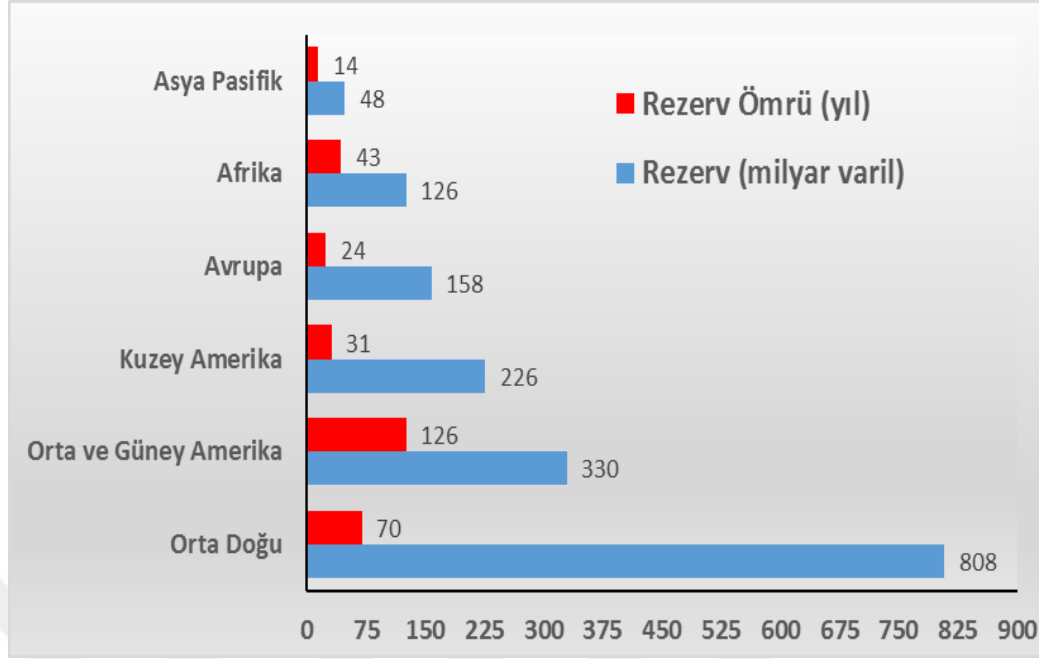
Türkiye'nin büyümekte olan üretim gücü ve dolayısıyla gelişen ekonomisi nedeniyle dünyadaki büyük enerji tüketicileri arasındaki yerini korumaktadır. Son yirmi beş yıl baz alındığında, Türkiye'nin birincil enerji tüketimi 55 milyon ton petrol karşılığından

155 milyon ton mertebelerine ulaşmıştır [2]. Şekil 1.2’de görüldüğü üzere, toplam birincil enerji arzı içerisinde petrol ve doğalgaz yaklaşık olarak %30,5’lik bir oran ile birinciliği paylaşmaktadır [1]. Türkiye’nin büyük ölçüde enerjide dışa bağımlı olması, enerji güvenliğini olumsuz etkilemektedir. Küresel çapta enerji fiyatlarındaki dalgalanmalar ülkenin finansman ihtiyacını doğrudan etkilemektedir. Türkiye’nin enerjide dışa bağımlılığının önlenmesi ve enerji arayışı uluslararası ilişkilerinde önemli etkilere neden olmaktadır.



Şekil 1.2. Türkiye’de birincil enerji tüketimi

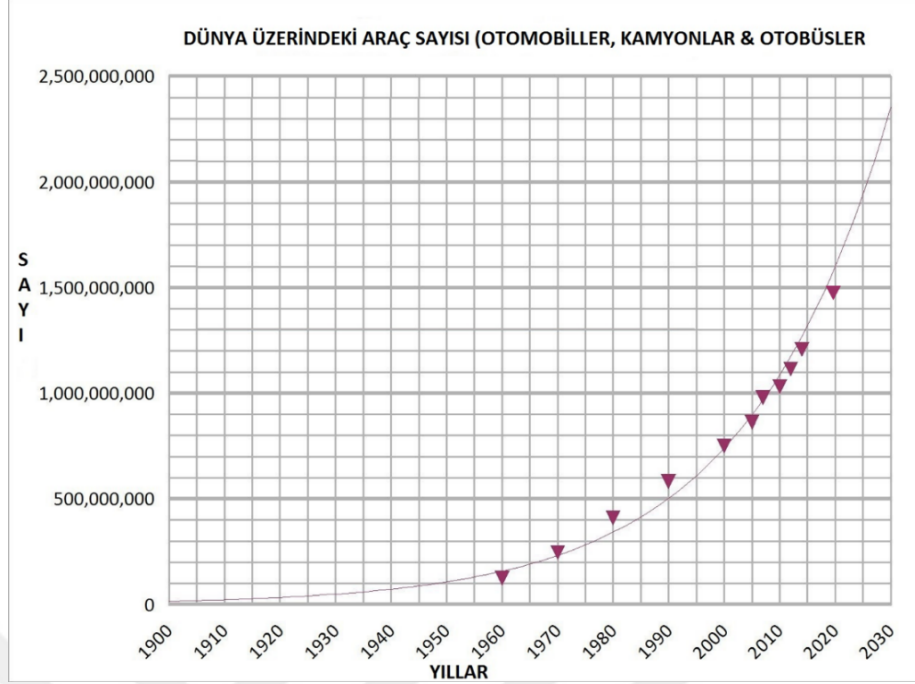
Yenilenemez bir enerji türü olan petrolün sınırlı bir rezerv ömrü bulunduğu belirtilmektedir. Dünya petrol rezervi, yapılan yeni araştırmalar sonucunda artış göstermekte ve bununla birlikte enerjiye duyulan talep her geçen gün daha da artmaktadır. 2016 yılında, tüm dünyaki ham petrol rezervi 1,7 trilyon varil, rezerv ömrü ise 50,6 yıl olarak tespit edilmiştir. 2017 yılında ise dünya ham petrol rezerv ömrü 50,2 yıl civarında belirlenmiştir. Dünya genelindeki rezerv miktarlarına bakıldığında (Şekil 1.3), birinci olarak Orta Doğu gelmekte, akabinde ise Orta Doğu’yu Orta ve Güney Amerika ve Kuzey Amerika takip etmektedir. Dünya genelindeki rezerv ömrüne bakıldığında ise birinci sırada 126 yıl ile Orta ve Güney Amerika gelirken, Orta Doğu ve Afrika sırasıyla 70 ve 43 yıl ile Amerika’yı takip etmektedir [1].



Şekil 1.3. Dünya petrol rezerv miktarı ve rezerv ömrü

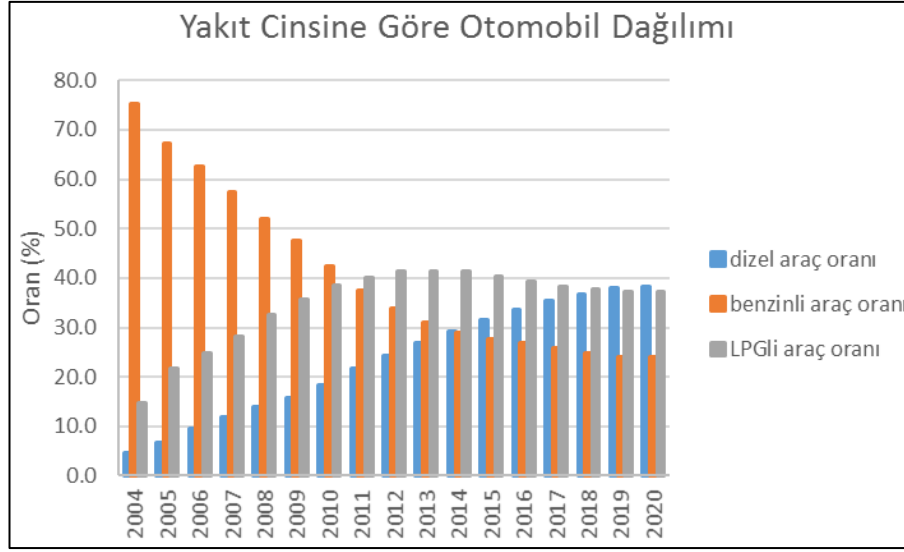
Türkiye’deki üretilebilir petrol rezervi 2020 yılı itibariyle 388,5 milyon varıldır [3]. Yeni rezervlerin bulunacağı göz ardı edilirse, petrol üretim miktarına bakıldığında petrol rezerv ömrü yaklaşık 18 yıl olarak hesaplanmıştır. Türkiye’de keşfedilen petrol sahalarından %93’ü küçük, geri kalan kısmı ise orta büyüklükteki saha sınıfında yer almaktadır. Petrol sahasının, büyük saha sınıfı olarak tanımlanması için 500 milyon varilden daha fazla bir rezerve sahip olması gerekmektedir ve ülkemizde büyük saha sınıfında rezerv bulunmamaktadır. Türkiye’deki sahaların büyük bir kısmı yaşlı sahalar kategorisinde olup kuyu verimleri gün geçtikçe azalmaktadır [1].

Dünyadaki en büyük endüstri türlerinden biri otomotiv endüstrisidir. Araçların günlük yaşamın vazgeçilmez bir parçası olması otomotiv endüstrisinin büyümesindeki en büyük nedenlerden biridir. İnsan hareketliliğinin günlük olarak artması, insanların ve malzemelerin taşınması gerekliliği araçlara olan talebin artmasına neden olmaktadır. Dünya üzerindeki kişisel araç sahip olma hızı da benzer şekilde artış göstermektedir. Gelişen teknoloji ile birlikte otomotiv endüstrisinde üretim adetleri ve üretim hızı yükseltilerek, artan araç talebini karşılamak üzere çalışmalar yapılmaktadır. Dünya üzerinde 1,06 milyarı binek, 363 milyonu ticari araç olmak üzere toplamda 1,42 milyar araç olduğu tahmin edilmektedir [4]. 2030 yılına kadar bu sayının Şekil 1.4’de gösterildiği gibi 2,5 milyara ulaşacağı öngörülmektedir [5].



Şekil 1.4. Dünya üzerindeki araç sayısı

Türkiye'deki durum dünya genelindeki duruma benzerlik göstermektedir. Kişisel araç sahip olma hızı her geçen gün artmaktadır. Son 15 yılda araç sayısı yaklaşık olarak %130'luk bir artış göstermiştir. TÜİK verilerine göre 2000'li yılların başında toplam araç sayısı 5 milyon civarında iken, 2020 yılında araç sayısı 12,5 milyon seviyelerindedir. Mevcut durumda, Türkiye'de trafiğe kayıtlı 4,8 milyon dizel araç, 3 milyon civarında benzinli araç ve 4,6 milyon LPG'li araç bulunmaktadır. Yakıt cinsi farketmeksizin araç sayısı her geçen gün artmaktadır. Şekil 1.5'de yıllık bazda yakıt cinsine göre araç dağılım grafiğinden görülebileceği üzere, dizel araçlar 2015 yılına göre %6,6'lık bir artış ile %38,2'lik bir dağılım oranına ulaşmıştır. Benzinli ve LPG'li araçların dağılım oranları ise 2020 yılı itibariyle sırasıyla %24,1 ve %37,2'lik değerlere gerilemiştir [6]. Otomotiv ve yakıt sektöründeki teknolojik gelişmeler ile birlikte araçların yakıt tüketim ve egzoz emisyon değerlerinde iyileştirmeyi amaçlayan düşük hacimli motorlar, düşük maliyetli yakıtlar ve bu yakıtlarla çalışabilecek motorlar ve emisyon azaltıcı yardımcı sistemler üzerine araştırma ve geliştirme çalışmaları yapılmaktadır. Buna rağmen, günümüzdeki milyarlarca aracın büyük çoğunluğu dünyanın geleneksel petrol rezervlerini tüketmekte ve zararlı egzoz gazlarını çevreye salmaktadır.



Şekil 1.5 Türkiye'deki yakıt cinsine göre otomobil dağılımı

Petrol rezervlerinin sınırlı olması ve ulaşım sektöründe petrol ihtiyacının artmasının yanı sıra alternatif yakıt arayışının temel nedenlerinden biri de insan sağlığıdır. Petrol yakıtlarının sebep olduğu kirletici gazlardan dolayı hem insan hem de çevre sağlığı tehlike altındadır. Küresel ısınmaya sebep olan CO₂ gazı ile NO_x ve HC gibi kirletici gazların miktar ve boyutları, uluslararası otoriteler tarafından kademeli olarak sınırlandırılmaktadır (Tablo 1.1). Bu kısıtlamalar, otomotiv ve yakıt sektörünü emisyon seviyelerinde iyileştirme yapmaya mecbur bırakmaktadır. Emisyon seviyesinde iyileştirmeler için bir takım ilave sistemler geliştirilerek ulaşım sektöründe kullanılmaktadır. Fakat, bu sistemler üreticilere ek maliyet getirmektedir. Bu aşamada ilave sistem maliyetinden kurtulmak adına alternatif yakıtlar ya da petrol yakıtlarına katkı olarak kullanılacak yakıtlar geliştirilerek emisyon seviyelerinde iyileştirmeler yapılabilmektedir.

Mevcut petrol rezervleri, uluslararası emisyon kısıtlamaları ve enerjide dışa bağımlılığın önemi düşünüldüğünde, kendi yaşam döngüsünde yenilenebilir, daha çevreci alternatif yakıt arayışı hız kazanmaktadır. Kendi yaşam döngüsünde yenilenebilir olan fuzel yaği içerisinde barındırdığı alkoller sayesinde içten yanmalı motorlarda kullanılacak alternatif yakıtlardan biridir. Melas, şeker pancarından şeker üretimi esnasında yan ürün olarak elde edilmektedir. Oluşan bu melastan etil alkol üretimi sırasında ise yan ürün olarak ortaya çıkan yakıt fuzel yaği olarak adlandırılmaktadır. Şeker üretimi sırasında yan ürün olarak ortaya çıkan melasın, alkol üretiminde değerlendirilmesi ve buna bağlı olarak fuzel yağinin alternatif yakıt olarak

değerlendirilmesi ekonomiye ve doğaya katkıda bulunacaktır. Fuzel yağının, enerji bağımlılığını azaltabilecek, fosil yakıtlara olan talebin azalmasını sağlayabilecek potansiyeli, üretimi ve içten yanmalı motorlarda kullanım aşaması da değerlendirilmelidir. Bu nedenle bu tez çalışmasında, fuzel yağının daha çevreci bir alternatif yakıt olarak dizel motorlarda kullanılabilirliği incelenmiştir.

Tablo 1.1. EU emisyon standartları [7]

Seviye	Tarih	CO	HC	HC+NOx g/km	NOx	PM	PN #/km
Sıkıştırma Ateşlemeli (Dizel)							
Euro 1+	1992.07	2,72 (3,16)	-	0,97 (1,13)	-	0,14 (0,18)	-
Euro 2, IDI	1996.01	1,0	-	0,7	-	0,08	-
Euro 2, DI	1996.01 ^a	1,0	-	0,9	-	0,10	-
Euro 3	2000.01	0,64	-	0,56	0,50	0,05	-
Euro 4	2005.01	0,50	-	0,30	0,25	0,025	-
Euro 5a	2009.09 ^b	0,50	-	0,23	0,18	0,005 ^f	-
Euro 5b	2011.09 ^c	0,50	-	0,23	0,18	0,005 ^f	6,0×10 ¹¹
Euro 6	2014.09	0,50	-	0,17	0,08	0,005 ^f	6,0×10 ¹¹
Kıvılcım Ateşlemeli (Benzin)							
Euro 1+	1992.07	2,72 (3,16)	-	0,97 (1,13)	-	-	-
Euro 2	1996.01	2,2	-	0,5	-	-	-
Euro 3	2000.01	2,3	0,20	-	0,15	-	-
Euro 4	2005.01	1,0	0,10	-	0,08	-	-
Euro 5	2009.09 ^b	1,0	0,10 ^d	-	0,06	0,005 ^{e,f}	-
Euro 6	2014.09	1,0	0,10 ^d	-	0,06	0,005 ^{e,f}	6,0×10 ^{11e,g}

a: 30.09.1999'a kadar, b: 01.2011 tüm modeller için, c: 01.2013 tüm modeller için, d: NMHC=0,068 g/km, e: Yalnızca direkt enjeksiyon motor kullanan araçlar için, f: 0,0045 g/km, g: 6,0×10¹² l/km, (): Üretim limit değeri.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Belirli bir rezerv ömrüne sahip ve kendi doğası içerisinde yenilenebilir olmayan yüksek karbon içerikli dizel yakıtı alternatif bulmak üzere yapılan çalışmalar özelliklerle son yıllarda artış göstermiştir. Ülkelerin, çevre denetçilerinin ve sivil toplum kurumlarının çevreyi kirlenici ve insan sağlığını tehdit eden fosil yakıtların kullanımı sonucu ortaya çıkan zararlı gazlarla mücadele etmeleri sonucunda, hem otomotiv hem de yakıt üretim alanında birçok araştırma yapılmaktadır. Yüksek oksijen içerikli yakıtların kendi başına ya da karışım olarak kullanılması ile motor performansı ve egzoz emisyonlarına olan etkileri araştırılmaktadır.

Bu bölümde, fuzel yağının içten yanmalı motorlarda kullanımına ilişkin literatür taraması yapılmıştır. Motorin yakıtı ile fuzel yağının kullanıldığı motorlarda yanma, performans ve egzoz emisyon karakteristikleri bakımından karşılaştırılması yapılan çalışmalar ve aynı zamanda fuzel yağının benzinli motorlarda kullanımı ile ilgili yapılan çalışmalar da incelenmiştir.

Literatür kapsamlı olarak incelendiğinde, fuzel yağı ile ilgili olarak yapılan ilk çalışmanın Wetherill tarafından 1853 yılında gerçekleştirildiği görülmektedir [8]. Fuzel yağının ilk olarak patateslerin fermantasyonundan elde edildiği ve fuzel yağının içeriği incelendiğinde su, alkol ve amil alkol ihtiva ettiği belirtilmiştir. Devam eden yıllarda, fuzel yağı ile ilgili olarak kısıtlı miktarda çalışma yapılmıştır [9, 10]. Fuzel yağı kaynaklı zehirlenmelerin belirtileri [11], fuzel yağının arıtılması sırasında oksijensiz çürütmenin fizibilite araştırması [12], fermantasyon işlemi sırasında daha düşük fuzel yağı içeriğine sahip etanol üretimi ve bu etanol ile fuzel yağı azaltılmış alkollü içeceklerin üretilmesi üzerine çalışmalar yapılmıştır [13].

Salis ve diğ. [14], yapmış oldukları çalışmada, fuzel yağının kısa zincirli alkoller için uygun bir kaynak olduğundan bahsetmişlerdir. Fuzel yağının biyodizel üretim sürecinde hammadde olarak kullanılmasıyla ilgili olarak yapılan çalışma sonucunda fuzel yağının oleik asit ester sentezi için kullanılabileceği belirtmişlerdir.

Özer [15], pirana yağından biyodizel üretiminde alkol olarak metanol, bütanol ve fuzel yağının kullanılmasının biyodizel üretimindeki etkilerini ve üretilen biyodizelin motor performans ve egzoz emisyonlarına etkisini deneysel olarak incelemiştir. Alkol çeşitlerinin biyodizel üretimi verimine etkisi metanol, bütanol ve fuzel yağı için sırasıyla %85, %83 ve %78 olmuştur. Biyodizel üretimi sırasında, fuzel yağı 6:1, 10:1, 15:1 ve 20:1 mol oranında kullanıldığında biyodizel verimi sırasıyla %59, %78, %79 ve %80 olarak gözlemlenmiştir. Fuzel yağı ile üretilen biyodizelin 65°C ve 10:1 mol oranının kullanıldığı durumda kinematik vizkozite haricinde diğer yakıt özelliklerinin biyodizel yakıt standartlarını sağladığı gözlemlenmiştir.

Alper ve diğ. [16] yapmış oldukları çalışmada, kurşunsuz benzin ve hacimsel olarak %10, %20 ve %30 oranlarında (F10, F20, F30) fuzel yağı içeren, fuzel yağı - kurşunsuz benzin karışımlarını test yakıtları olarak kullanmışlardır. Bu yakıtlar, dört zamanlı, tek silindirli, buji ateşlemeli ve supap arkasına püskürtme teknolojisine sahip bir motorda test edilerek, test yakıtlarının motor performansına ve egzoz emisyonlarına etkileri değerlendirilmiştir. Testler 1500, 2500, 3500 ve 5000 dev/dk motor hızları ve %25 pedal açıklığından %100 pedal açıklığına, %25'lik yük artışı şartlarında gerçekleştirilmiştir. Fuzel yağı, yaklaşık olarak %10 civarında su içermektedir ve ayrıca ısı değeri kurşunsuz benzinden daha düşüktür. Karışım içerisindeki fuzel yağı oranı artışıyla doğru orantılı olarak motor torkunun arttığı ve aynı şartlarda özgül yakıt tüketiminin (ÖYT) yükseldiği gözlemlenmiştir. Saf benzin yakıtına göre, tüm motor hızları için ortalama güç artışı F10 yakıtında %1,44, F20 yakıtında %1,86 ve F30 yakıtında ise %2,32 olarak gerçekleşmiştir. Bu durumun ana nedeni olarak, oksijen içerikli fuzel yağının yanmayı iyileştirmesi üzerinde durulmuştur. Özgül yakıt tüketiminde en yüksek artış F30 yakıtı ile %7,7 olarak elde edilmiştir. Fuzel yağı karışımli test yakıtlarının, gizli buharlaşma ısılarının yüksek olması nedeniyle yanma sonu sıcaklıkların düştüğü gözlemlenmiştir. Bu durum, fuzel yağı karışımli yakıtlar için saf benzin yakıtına göre HC emisyonlarında artışa, NO_x emisyonlarında ise azalmalara sebep olmuştur. Saf benzin yakıtına göre HC emisyonundaki en yüksek artış F30 yakıtında %17,6 ve NO_x emisyonundaki en yüksek azalış ise yine F30 yakıtında %3,1 olarak gerçekleşmiştir.

Hamit ve diğ. [17], yaptıkları çalışmada tek silindirli, dört zamanlı, buji ateşlemeli, avansı ve sıkıştırma oranı değiştirilebilir bir motorda 2500 dev/dk motor hızı ve 4

farklı motor yükünde (%25, %50, %75, %100) fuzel yağının performans, yanma ve emisyon değerlerini irdelemişlerdir. Testler, benzine %50 oranında fuzel yağı karıştırılarak (F50) ve %100 fuzel yağı (F100) ile gerçekleştirilmiştir. Testler sırasında hava fazlalık katsayısı değeri 1 olarak sabit tutulmuştur. Fuzel yağının su içeriği nedeniyle yanmayı kötüleştirdiği gözlemlenmiştir. F50 ve F100 yakıtlarında, yanma gelişimi ve yanma yayılım sürelerinin uzadığı gözlemlenmiştir. F50 ve F100 yakıtı ile yapılan testlerde benzine göre yük arttıkça ısı dağılım oranları ve ortalama indike basınç azalmıştır. Fuzel yağının kullanılması ile birlikte CO ve HC emisyonları sırasıyla maksimum %21 ve %25 oranında artarken, NOx emisyonu ise %31 oranında azalmıştır.

Demirkul [18], tek silindri, 4 zamanlı ve buji ateşlemeli bir motorda yakıt olarak benzin, etanol ve fuzel yağı karışımları kullanmıştır. Yakıtlar, B100E0F0 (%100 kurşunsuz benzin), B50E0F50 (%50 kurşunsuz benzin - %50 fuzel yağı), B50E10F40 (%50 kurşunsuz benzin - %10 Etanol - %40 Fuzel yağı), B50E20F30 (%50 kurşunsuz benzin - %20 Etanol - %30 Fuzel yağı), B50E30F20 (%50 kurşunsuz benzin - %30 Etanol - %20 Fuzel yağı), B50E40F10 (%50 kurşunsuz benzin - %40 Etanol - %10 Fuzel yağı) ve B50E50F0 (%50 kurşunsuz benzin - %50 Etanol) karışımları olarak belirlenmiştir. Testler 2000-4000 dev/dk motor hızı aralığında, 500 dev/dk artışla ve kısmi yük şartlarında gerçekleştirilmiştir. Maksimum güç B100E0F0 yakıtında 2500 dev/dk'da, diğer yakıtlarda ise 3000 dev/dk motor hızlarında elde edilmiştir. Etanol ve fuzel yağının su içeriği ve düşük ısıl değerleri nedeniyle efektif güçte düşüş olması beklenmiş ancak en yüksek güç B50E50F0 yakıtı ile 3000 dev/dk'da gözlemlenmiştir. Bu durumun nedeni, alternatif yakıtlarda su içeriğinin yanma sırasında yüksek basınçlı su buharına dönüşerek silindirdeki basıncı artırması olarak değerlendirilmiştir. En düşük yakıt tüketim değeri B50E50F0 yakıtı ile 3000 dev/dk motor hızında gözlemlenmiştir. Silindir içi ortalama basınç ve termik verim etanol oranı arttıkça artış göstermiştir. Fuzel yağ oranının artışı ile birlikte HC emisyonları yükselmiştir. B100E0F0 yakıtına kıyasla HC emisyonlarındaki en yüksek artışın B50E0F50 yakıtı ile (kısmi yükte ve farklı devirlerdeki değerlerin ortalaması alındığında) %7 olduğu gözlemlenmiştir. Karışım içerisindeki fuzel yağının artışı CO emisyonlarını da olumsuz etkilenmiştir. Fuzel yağ oranının artışı NOx emisyonlarında ise azalmaya sebep olduğu gözlemlenmiştir. NOx emisyonlarındaki en düşük değer 4000 dev/dk

motor hızında B50E0F50 yakıtı ile 166 ppm, en yüksek değer ise B100E0F0 yakıtı ile 230 ppm olarak ölçülmüştür.

Omar ve diğ. [19], yapmış oldukları çalışmada tek silindirli, dört zamanlı ve sıkıştırma ateşlemeli bir motor kullanmışlardır. Test yakıtı olarak saf motorin ile %20 fuzel yağı ve %80 motorinden oluşan karışım (F20) tercih etmişlerdir. Testler %50 ve %75 motor yükünde, 1200-2400 dev/dk arasında 300 dev/dk aralıklarla beş farklı motor hızında yapılmıştır. F20 yakıtı ile yapılan testler dizel ile karşılaştırıldığında maksimum motor torku ve güç değerlerinde bir azalma gözlemlenmiştir. Motor performansındaki bu azalmaya, fuzel yağının motorine kıyasla yüksek su içeriği, düşük ısı değeri ve düşük setan sayısı gibi özelliklerinin sebep olduğu belirtilmiştir. Fuzel yağının üst ısı değerinin 29,53 MJ/kg, motorinin üst ısı değerinin ise 47,5 MJ/kg olmasına rağmen motorun tork ve güç değerlerinin motorin kullanılan şartlara oldukça yakın olduğu gözlemlenmiştir. Fuzel yağının kullanılması ile birlikte, özgül yakıt tüketimi, özellikle yüksek motor devirlerinde ve %75 motor yükünde ortalama %8 artmıştır. F20 test yakıtı için tutuşma gecikmesi tüm motor devirlerinde ve yüklerinde ortalama %7 daha uzun olmuştur. Bununla birlikte, tüm test şartlarında NOx emisyonlarında bir azalma gözlenirken, F20 için NOx emisyonlarındaki maksimum düşüş motorine kıyasla her iki yükte de %28 olmuştur. Buna rağmen CO₂ ve CO emisyonlarının arttığı gözlemlenmiştir.

Omar ve diğ. [20], yapmış olduğu diğer bir çalışmada, fuzel yağındaki su içeriğinin azaltılmasının yakıt özelliklerine etkisini incelemişlerdir. Bunun yanında, su içeriği azaltılan fuzel yağının buji ateşlemeli bir motorda performans ve emisyon karakteristiklerini deneysel olarak araştırmışlardır. Motor testleri doğal emişli, su soğutmalı, 4 zamanlı ve 4 silindirli bir motor ile yapılmıştır. Deneyler 4500 dev/dk motor hızında, %15, %30 ve %45 motor yükünde yapılmıştır. Fuzel yağının su içeriğinin %13,5'ten %6,5 oranına azaltılması sonucunda, ısı değeri %13 oranında artarak 29,9 MJ/kg'dan 33,8 MJ/kg'a yükselmiştir. Aynı zamanda karbon içeriği %7,9 artmıştır. Fuzel yağının su içeriğinin azaltılması oksijen içeriğinin de azalmasına sebep olmuştur. Bu durumda oksijen içeriği %14 oranında azalmıştır. Fuzel yağı oranı arttıkça karışımın ısı değeri azalmıştır. Tüm motor çalışma şartları için, fuzel yağı-benzin karışımı kullanılarak elde edilen maksimum motor gücü değerlerinin, benzine kıyasla bir miktar daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca, su içeriği azaltılmış

fuzel yağının (FAWE10 ve FAWE20), su içeriğine müdahale edilmemiş fuzel yağına (FBWE10 ve FBWE20) kıyasla bir miktar daha yüksek motor gücü sağladığı belirlenmiştir. Tüm yük koşullarında su içeriğinden bağımsız olarak fuzel yağı katkısı CO, CO₂, NO_x ve HC emisyonlarını artırmıştır. Su içeriğinin azaltılması NO_x, HC ve CO₂ emisyonlarının bir miktar yükselmesine neden olmuştur. HC emisyonlarındaki su içeriğine bağlı azalmanın ortalama %5 olduğu ifade edilmiştir. Tüm test yakıtlarında motor yükünün artmasıyla NO_x ve CO₂ emisyonlarının artış gösterdiği tespit edilmiştir.

Şimsek [21], buji ateşlemeli bir motorda yüksek sıkıştırma oranlarında, yakıt özellikleri iyileştirilmiş fuzel yağının kullanımının motor performansı ve egzoz emisyonları üzerindeki etkisini deneysel olarak incelemiştir. Deneysel olarak dört zamanlı, tek silindirli, hava soğutmalı ve 8:1 sıkıştırma oranına sahip buji ateşlemeli bir motor kullanılmıştır. Deneysel olarak dört farklı sıkıştırma oranında (8,0:1, 8,5:1, 9,12:1, 10,07:1) gerçekleştirilmiştir. Deneysel olarak yakıt olarak fuzel yağı benzin karışımları (F10, F20, F30, F40, F50), kurşunsuz benzin ve fuzel yağı kullanılmıştır. Deneysel olarak 1700 dev/dk sabit motor hızında ve 1-6 kW arasında 1kW'lık yük artışlarında gerçekleştirilmiştir. Deneysel sonuçlarına göre, sakızlaşma ve su içeriği azaltılarak yakıt özelliği iyileştirilmiş fuzel yağının yüksek sıkıştırma oranlarında efektif verim üzerindeki etkisi özellikle F30 yakıtında belirgin olarak ortaya çıkmıştır. F30 yakıtı için verimdeki en büyük artış 9,12 sıkıştırma oranında %6,91 olarak elde edilmiştir. Motor momentindeki maksimum artış yine F30 yakıtı ile 9,12 sıkıştırma oranında %6,93 olarak gerçekleşmiştir. Özgül yakıt tüketiminin, F30 yakıtı ile maksimum efektif verimin sağlandığı yükte %2,66 azaldığı görülmüştür. Egzoz emisyonlarında HC ve CO emisyonlarının azaldığı, NO_x ve CO₂ emisyonlarının ise arttığı tespit edilmiştir.

Yılmaz [22] yapmış olduğu çalışmada, tek silindirli, dört zamanlı, hava soğutmalı sıkıştırma ile ateşlemeli bir motor kullanarak fuzel yağının motor performans ve egzoz emisyonlarına etkisi incelemiştir. Testler, saf dizel yakıtına %5 (F5) ve %10 (F10) oranında fuzel yağı karıştırılarak oluşturulan test yakıtları ile altı farklı motor devrinde (1750, 2000, 2200, 2500, 2750 ve 3000 dev/dk) gerçekleştirilmiştir. Motor torku, hem F5 hem de F10 test yakıtında 2200 dev/dk'ya kadar olan devir artışına bağlı olarak artmıştır. Motorine göre motor torku, 2200 dev/dk'da F5 yakıtı için %2, F10 yakıtı için ise %4,5 azalmıştır. Özgül yakıt tüketimi aynı devir şartında F5 ve F10 yakıtları

için sırasıyla %8,3 ve %18,4 artış göstermiştir. Tüm devir şartlarında motorine katkı yapılan fuzel yağı oranı arttıkça NOx ve is emisyonlarında azalma görülürken, CO emisyonlarında ise artış gözlemlenmiştir. Minimum egzoz emisyon değerleri, NOx emisyonu için F10 yakıtı ile 2200 dev/dk'da, CO emisyonu için motorin yakıtı ile 2500 dev/dk'da ve is emisyonu için F10 yakıtı ile 2500 dev/dk'da elde edilmiştir. F5 ve dizel yakıtının yanma başlangıcı üst ölü noktadan 3,6 krank açısı (°KA) önce gerçekleşmiştir. Dizel yakıt için maksimum silindir içi basıncı üst ölü noktadan 8,1 °KA sonra 54,14 bar olarak, F5 yakıtı ise üst ölü noktadan 2,8 °KA sonra 50,2 bar olarak ölçülmüştür.

Calam [23] yapmış olduğu çalışmada, tek silindirli, 4 zamanlı, emme portuna püskürtmeli ve homojen dolgulu sıkıştırma ile ateşlemeli (HCCI) benzinli bir motor kullanmıştır. Heptan yakıtı ve heptan ile fuzel yağı karışımının motor performans, yanma ve egzoz emisyon değerlerini deneysel olarak araştırmıştır. Test yakıtı olarak heptan ve heptan-fuzel yağı karışımı F20 (%80 heptan + %20 fuzel yağı), F40 (%60 heptan + %40 fuzel yağı), F60 (%40 heptan + %60 fuzel yağı) kullanılmıştır. Ayrıca çalışmada farklı hava fazlalık katsayısı ve farklı emme havası sıcaklıklarında testler gerçekleştirilmiştir. Testlerde heptan ve F20 yakıtı ile motor hızı olarak maksimum 1600 dev/dk, F40 yakıtı ile maksimum 1400 dev/dk ve F60 yakıtı ile maksimum 1200 dev/dk'lara çıkılabilmektedir. Yapılan çalışmada, maksimum silindir içi basınç değeri 71,96 bar olarak heptan yakıtı ile hava fazlalık katsayısı (HFK) 2 iken ve motor devri 800 dev/dk şartlarında gözlemlenmiştir. Maksimum indike ortalama basınç değeri F30 yakıtı ile 800 dev/dk motor hızında ve HFK 4 olduğunda 5,97 bar olarak gözlemlenmiştir. Maksimum termik verim F60 yakıtı ile 1,8 HFK koşulunda %45,4 olarak hesaplanmıştır. Aynı şartlar altında termik verim heptan, F20 ve F40 yakıtında sırasıyla %29,1, %32,7 ve %34,7 olarak belirlenmiştir. Aynı test koşulları altında, fuzel yağı oranının artmasına bağlı olarak HC emisyonları artış göstermiştir. F60 yakıtı için HC emisyonu, 353K emme havası sıcaklığında ve 2,5 HFK değerinde heptan yakıtına göre yaklaşık %108 fazladır. Aynı test şartlarındaki F60 yakıtının CO emisyonu ise heptana göre yaklaşık %400 fazladır. Fuzel yağı oranı artışına bağlı olarak NOx emisyonlarında ise azalma gözlemlenmiştir.

Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde; yüksek oksijen içerikli yakıtların içten yanmalı motorlarda kullanımı ile ilgili çok sayıda çalışma yapıldığı gözlemlenmiştir.

Alkol içerikli yakıtların hem dizel hem de benzinli motorlarda kullanımına dair literatürde birçok çalışma bulunmaktadır. Ancak, fuzel yağı kullanımıyla ilgili çalışma alanları daha az olup, genel olarak fuzel yağının üretimi ve benzinli motorlarda kullanımına yönelik araştırmalar yapılmış ya da fuzel yağı motorin ile karıştırılarak tek silindirli motorlarda performans ve emisyon testleri gerçekleştirilmiştir. Yapılan bu tez çalışmasında ise, motorin ve fuzel yağı karışımının CRDI bir dizel motorda performans, enjeksiyon, yanma ve egzoz emisyon karakteristikleri incelenmiştir.



3. ALTERNATİF YAKIT OLARAK FUZEL YAĞI

Günümüzde enerjiye olan talep sürekli olarak artış göstermektedir. Ulaşım sektöründe enerji talebinin büyük çoğunluğu fosil yakıtlar ile karşılanmaktadır. Geçmişten günümüze yapılan araştırmalar, petrol rezervlerinin sınırlı olduğunu göstermektedir. Enerjide dışa bağımlılığın engellenmesi, enerji güvenliği ve ulusların kalkınmaları için önem arz etmektedir. Aynı zamanda, çevre bilincindeki artış ve geliştirilen standartlar ile ulaşım sektörünü etkileyen yaptırımlar, doğadan elde edilebilen kendi döngüsünde yenilebilir alternatif yakıt arayışını arttırmıştır. Mevcut durumda petrol yakıtlarının kullanımı tamamen sınırlanamayacağı ve kısa zamanda tamamen elektrikli araç kullanımına geçilemeyeceği düşünüldüğü için, gelecekteki emisyon regülasyonlarına uyum sağlayabilmek ve egzoz emisyonlarının iyileştirilmesini sağlamak amacıyla araştırmacılar için alternatif yakıt kullanımı kısa zamanda çözüm odaklı olacaktır. Bu bölümde, içten yanmalı motorlarda kullanılan alternatif yakıtlar, fuzel yağı ve özellikleri, fuzel yağının elde edilişi ve kullanım alanları hakkında bilgi verilmiştir.

3.1. İçten Yanmalı Motorlarda Kullanılan Alternatif Yakıtlar

Sürekli olarak artış eğiliminde olan enerji talebini karşılama ihtiyacı ve daha çevreci enerji arayışı özellikle ulaşım sektöründe alternatif yakıt arayışını hızlandırmıştır. Otomotiv sektöründe alternatif yakıtların kullanılabilmesine imkan sağlayan içten yanmalı motorlar (İYM) için AR-GE faaliyetleri geçmişten günümüze yoğun bir şekilde devam etmektedir. İçten yanmalı motorlarda direkt olarak ya da belirli oranlarda karışım şeklinde olmak üzere doğalgaz, biyodizel ve bazı alkol türleri yakıt olarak kullanılabilir.

Doğalgaz, gaz formundaki çeşitli alkanların karışımından oluşmaktadır ve herhangi bir rafineri işlemine ihtiyaç duyulmadan doğal yollardan elde edilebilmektedir. Diğer fosil yakıtlara göre enerji birimi başına düşük karbon içeriği sayesinde çevre dostu bir yakıt olarak tanımlanmaktadır. Yüksek oktan sayısı sebebiyle vuruntu önleme etkisi diğer fosil yakıtlara göre daha iyidir. Benzinli motorlarda modifikasyona ihtiyaç duymadan kullanılabilir [24].

Biyodizel, bitkisel, hayvansal ya da atık yağların alkoller eşliğinde reaksiyona sokulmasıyla üretilmektedir. Biyodizel, atık yağlardan üretilmesi durumunda hem üretim maliyetini azaltmakta hem de atıklar bertaraf edilerek çevre kirliliğini önlemeye yardımcı olmaktadır. Isıl değer olarak motorin ile kıyaslandığında daha düşük ısıl değere sahip olmasına rağmen CO ve HC emisyonlarının iyileştirilmesine katkı sağlamaktadır. Biyodizel fiziksel ve kimyasal özellikler bakımından motorine oldukça benzemektedir ve bu nedenle dizel motorlarda kullanılmak üzere tercih edilmektedir [25, 26].

Alkoller, içten yanmalı motorlarda petrol kökenli yakıtlara karıştırılarak kullanılabilir. Etanol, metanol ve bütanol içten yanmalı motorlarda kullanılabilen alkol türlerinden bazılarıdır. Yakıt standartları gereği alkoller belirlenen oranlarda referans yakıtı karıştırılarak özellikle kıvılcım ateşlemeli içten yanmalı motorlarda tercih edilebilmektedir. Alkoller daha düşük ısıl değere sahip olmakla birlikte yüksek oksijen içeriğine sahiptirler. Alkoller yüksek oksijen içeriği sayesinde yanmayı iyileştirerek silindir içerisinde daha temiz bir yanma gerçekleşmesine katkıda bulunmaktadır. Fuzel yağı, yağ olarak isimlendirilmesine rağmen içeriğinde alkol ihtiva etmektedir [27, 28].

3.2. Fuzel Yağı

Fermante karbonhidratların damıtılmasıyla yüksek molekül ağırlıklı ve yüksek zincirli alkoller üretilmektedir [29]. Fuzel yağı, fermantasyon yoluyla etil alkol üretim endüstrisinde distilasyon prosesinin yan ürünüdür ve amil alkollerin doğal kaynağıdır [30]. Fuzel yağı, hoş olmayan ve çok keskin bir kokuya sahip olup, fermantasyon sırasında kullanılan hammaddeye göre kahverengi, sarımsı, yeşil veya renksiz olabilmektedir [31]. Fermantasyon ile alkol üretimi sırasında kullanılan kaynağın türü, hazırlanma süreci ve fuzel yağının fermantasyon sonrası damıtma yöntemine bağlı olarak fuzel yağının bileşimi ve bileşen miktarı değişkenlik gösterebilmektedir. Ticari bir tesiste alkol üretimi sırasında elde edilen fuzel yağı miktarı, kullanılan hammaddeye bağlı olarak üretilen her 1000 litre alkol başına 1 ile 11 litre arasında değişebilmektedir. İzooamil, izobütil ve n-amil alkollerini yüksek sıklıkta, n-bütil ve izopropil alkoller ise daha düşük sıklıkta fuzel yağının ana bileşenlerini oluşturmaktadır. Tablo 3.1’de fuzel yağının oluşturan bileşenler, bileşenlerin fuzel yağı

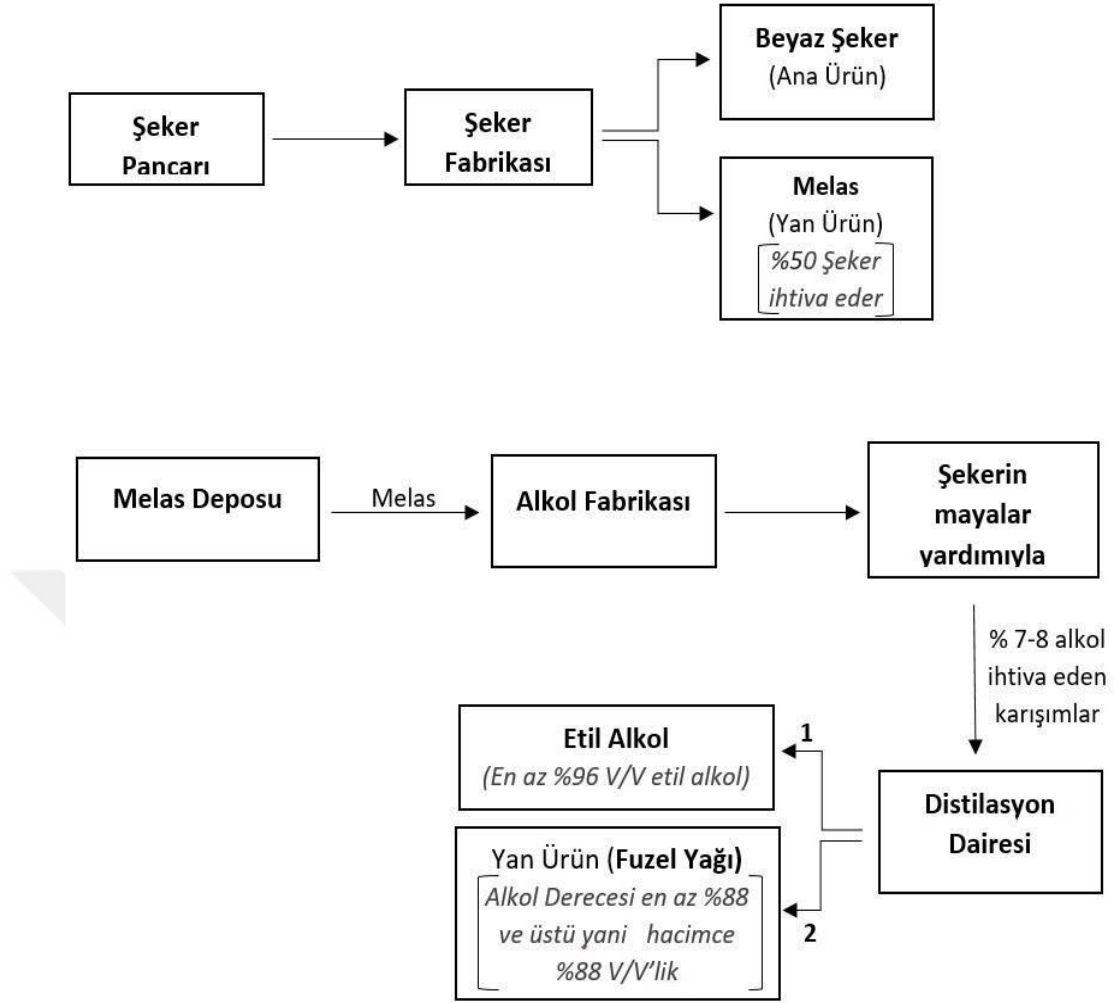
içerisindeki yüzdesel dağılımı ve bileşenlerin genel özellikleri paylaşılmıştır. Fuzel yağı, ana bileşeni olan alkollere ilave olarak yapısında az miktarda su, oldukça düşük miktarda aldehit, asit, asit esterleri ve terpen ihtiva etmektedir [32].

Tablo 3.1. Fuzel yağı bileşenleri ve genel özellikleri [9]

Bileşen	Kimyasal Formülü	Molekül Ağırlığı (g/mol)	Yoğunluk (g/cm ³)	Kaynama Noktası (°C)	% Hacimsel	% Kütleli	Özgül Isısı (cal/g°C)
i-amil alkol	C ₂ H ₁₂ O	88,15	0,8104	131,1	63,93	61,52	0,53
i-bütil alkol	C ₄ H ₁₀ O	74,12	0,802	108	16,66	15,87	0,59
n-bütil alkol	C ₄ H ₁₀ O	74,12	0,8098	117,73	0,736	0,708	0,687
n-propil alkol	C ₃ H ₈ O	60,09	0,8034	97,1	0,738	0,704	0,59
etanol	C ₃ H ₆ O	46,07	0,789	78,4	9,58	8,98	0,68
su	H ₂ O	18	1	100	10,3	12,23	1

3.3. Fuzel Yağının Elde Edilişi

Alkol üretim prosesinde farklı hammaddeler kullanılabilir. Kullanılan hammaddeler, alkol içeren hammaddeler, şeker içeren ve fermante olabilen hammaddeler ve fermante olup şekerlere dönüşebilen karbonhidrat içeren hammaddeler olarak gruplandırılabilir. Şeker pancarı, alkol üretimi sırasında kullanılan, şeker içeren ve fermante olabilen hammaddelerin başında gelmektedir. Şeker pancarı işlenmesi prosesinde yan ürün olarak posa ve şeker ayrımı sonrasında ortaya çıkan melas oluşur [32]. Yan ürün olarak oluşan melas %50 oranında şeker ihtiva etmektedir. Alkol üretim tesislerinde, melas fermante edilerek, sonrasındaki ayrıştırma işlemleri sırasında etil alkol ve yan ürün olarak en az %88 alkol derecesine sahip fuzel yağı elde edilir. Şeker pancarından şeker üretimi, yan ürün olarak oluşan melas, melastan alkol üretimi ve yan ürün olarak oluşan fuzel yağının elde edilme şematığı Şekil 3.1’de paylaşılmıştır. Şeker pancarının hammadde olarak kullanıldığı şeker üretim prosesinde yan ürün olarak elde edilen melas, alkol üretim tesisine gönderilir. Alkol üretim tesisinde fermantasyon sonrası oluşan ürünler distilasyona tabi tutularak ayrıştırılır. Ayrıştırma sonucunda etil alkol ve yan ürün olarak fuzel yağı oluşur [21]. Yan ürün olarak elde edilen fuzel yağı herhangi bir ilave işleme gerek duymadan depolanabilmektedir. Fuzel yağı direkt olarak ya da su içeriği azaltılarak farklı alanlarda yakıt olarak kullanılır.



Şekil 3.1. Fuzel yağının elde edilişi [21]

3.4. Fuzel Yağının Kullanım Alanları

Alkol üretimi sırasında bir yan ürün olarak elde edilen fuzel yağı farklı kullanım alanlarına sahiptir. Bazı alanlarda direkt olarak kullanılırken, bazı alanlarda prosese yardımcı olması amacıyla kullanılmaktadır.

- 1920'lerin sonuna kadar ticari olarak amil alkol üretiminde fuzel yağı tek kaynak olarak kullanılmıştır. Amil alkol üretiminde fuzel yağı kullanımı devam etmektedir [32].
- Bazı ülkelerdeki işletme tesislerinde, enerji elde etmek için yakılarak kullanılmaktadır [33].
- Fuzel yağı, boya ve solvent üretiminde çözücü olarak kullanılmaktadır [9].
- Fuzel yağı, çeşitli biyoyakıt ve muz aroması olarak bilinen izoamil asetat üretimi amaçlanarak yapılan deneysel çalışmalarda kullanılmıştır [9, 34].

- Fuzel yağı, Türkiye’de şeker üretimi sırasında köpük söndürücü olarak ya da ispirto yapımında kullanılmıştır. Bununla birlikte, kullanılmayan önemli bir kısmı atılmaktadır [35].
- Fuzel yağı, son zamanlarda petrol kökenli yakıtlara karıştırılarak da kullanılmaktadır. Hem benzinli hem de dizel motorlarda alternatif yakıt olarak fuzel yağı kullanımı ile ilgili çalışmalar son zamanlarda artış göstermiştir [15-23].

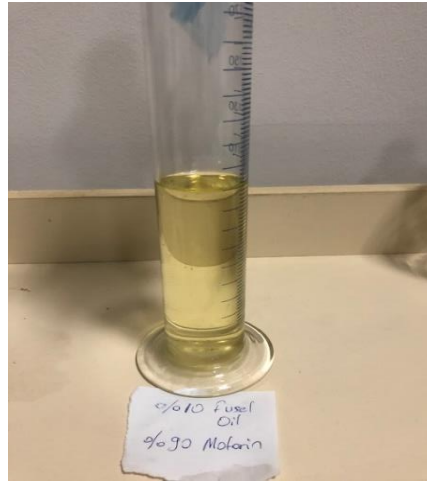
Fuzel yağının ülkemizdeki potansiyeline bakıldığında ise; bu tez çalışmasında kullanılan fuzel yağının temin edildiği Konya Şeker Fabrikası verilerine göre günlük 700 ile 1000 litre arasında fuzel yağı yan ürün olarak elde edildiği öğrenilmiştir. Kısmi miktarda satışı yapılan fuzel yağının büyük çoğunluğu depolanmaktadır. Eskişehir Şeker Fabrikası’ndan alınan bilgiye göre günlük 50 litre civarında fuzel yağı elde edilmektedir ve fuzel yağının tümü depolanmaktadır. Özel kuruluşlardan olan Tarkim’den elde edilen bilgilere göre günlük fuzel yağı eldesi 200 litre civarında olmakla birlikte elde edilen fuzel yağı farklı proseslerde tekrar kullanılmaktadır.

4. MATERYAL VE METOT

Motor deneylerinde referans yakıt olarak kullanılan motorin yerel bir yakıt istasyonundan alınmıştır. Şeker pancarından şeker üretimi sırasında arta kalan melastan alkol üretimi sırasında yan ürün olarak ortaya çıkan ve testlerde kullanılan fuzel yağı Konya Şeker Fabrikası'ndan temin edilmiştir. Fuzel yağının saflık derecesi %88 oranındadır. Bu bölümde, tez kapsamındaki deneysel çalışmalar sırasında kullanılan sistemler, ölçüm ekipmanları, ölçüm sonuçlarından alınan değerler ile yapılacak hesaplamalarda kullanılacak formüller ve test sonuçları ile yapılacak analizler hakkında bilgilendirme yapılmıştır.

4.1. Test Yakıtları

Bu tez çalışmasında, referans yakıt olarak saf motorin ve motorin-fuzel yağı karışım yakıtı kullanılmıştır. Karışım yakıt Şekil 4.1'de paylaşılmıştır. Fuzel yağı %10 oranında saf motorin ile karıştırılarak oda sıcaklığında bekletilmiştir. Karışım test yakıtı, 7 gün boyunca kontrol edilerek saf motorin ile herhangi bir faz ayrışması olup oluşmadığı gözlemlenmiştir. Karışım yakıtında herhangi bir faz ayrışması gözlemlenmemiştir. Bu nedenle motor test sistemindeki yakıt tankında harici bir karıştırıcı kullanılmamıştır. Fuzel yağı ve motorinin yakıt özellikleri Tablo 4.1'de paylaşılmıştır.



Şekil 4.1. F10 test yakıtı

Tablo 4.1. Test yakıt özellikleri [36]

Yakıt Özellikleri	Motorin	Fuzel Yağı	F10
Yoğunluk (kg/m ³ @15°C)	835	800	831
Vizkozite (mm ² /sn @40°C)	2,92	4,16	3,04
Isıl Değer (MJ.kg-1)	45	35	44
Setan Sayısı	54	42	53
Su İçeriği (%)	0,02	13,5	1,37
Oksijen İçeriği (%)	0	18	1,8

4.2. Motor Test Düzeneği ve Ölçüm Sistemleri

Bu tez çalışmasında gerçekleştirilen deneysel çalışmalar Kocaeli Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Otomotiv Mühendisliği Bölümü Motor Test Laboratuvarında yapılmıştır. Bu kısımda, deney motorundan, motoru yükleyecek dinamometreden, kontrol sisteminden, data toplama cihazlarından ve testler sırasında kullanılan ölçüm ekipmanlarından bahsedilmiştir.

4.2.1. Test motoru

Testler sırasında CRDI yakıt sistemine sahip, turbo beslemeli, ara soğutuculu, su soğutmalı, 4 zamanlı, 4 silindirli bir dizel motor kullanılmıştır. Test motoruna ait teknik özellikler Tablo 4.2’de verilmiştir. Deneysel çalışmaların gerçekleştirildiği dizel motor, güç ve hacim aralığı bakımından binek ya da hafif ticari araçlarda kullanılmaktadır. Test koşullarının belirlenmesi sırasında bu araçların kullanım trendi değerlendirilerek, sıklıkla kullanıldığı devir bandı 1500-2500 dev/dk arasından üç farklı motor devri (1500 dev/dk, 1800 dev/dak ve 2100 dev/dk) ve motor yükü olarak 125 Nm seçilmiştir. Test motoru stok motor olup, motor üzerinde herhangi bir modifikasyon yapılmamıştır. Test motoru Şekil 4.2’de paylaşılmıştır.

Tablo 4.2. Test motoru özellikleri

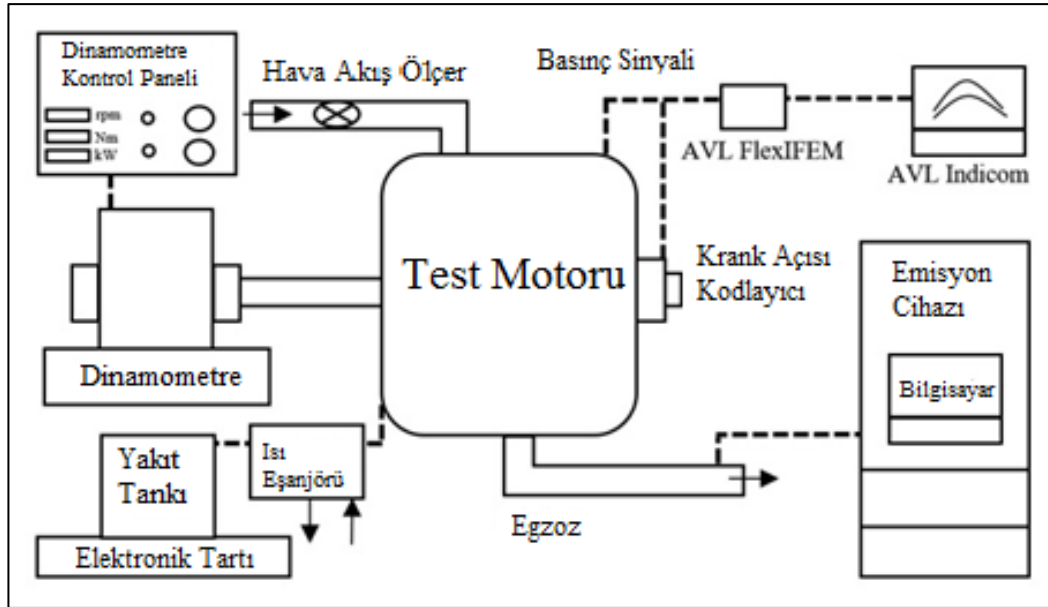
Motor	1,9 litre, Fiat JTD
Model	Direkt enjeksiyonlu, turbo beslemeli, ara soğutmalı, dört zamanlı, su soğutmalı, common-rail
Silindir Sayısı	4
Silindir Çapı - Strok	82 mm - 90,4 mm
Sıkıştırma Oranı	18,45:1
Maksimum Güç	77 kW @ 4000 dev/dk
Maksimum Tork	205 Nm @ 1750 dev/dk



Şekil 4.2. Test motoru

4.2.2. Test düzeneği ve ölçüm sistemleri

Deneysel çalışmada kullanılan motorun belirlenen yük değerlerinde koşullandırılması için hidrolik dinamometre, dinamometre kontrolü için kontrol paneli, emisyon ölçüm cihazı, diğer ölçüm ve yardımcı ekipmanlar ile ölçülen değerlerin toplanması sırasında kullanılan data toplayıcının olduğu test düzeneğinin şematik görünümü Şekil 4.3’de paylaşılmıştır.



Şekil 4.3. Test sistemi şematik görünümü

Motor testlerinde, motoru yüklemek için Baturalp-Taylan marka BT-190 FR model hidrolik bir dinamometre kullanılmıştır. Dinamometre görseli Şekil 4.4’te ve dinamometreye ait teknik özellikler Tablo 4.2’de paylaşılmıştır. Dinamometre motor

bağlantısı kardan şaft ile yapılarak motor-dinamometre hizalaması sonrasında devreye alma işlemi gerçekleştirilmiştir. Dinamometre içinde bulunan çarka çarpan suyun debisi ve çarkta dolaşan su miktarı ayarlanarak motor yükleme işlemi gerçekleştirilmiştir. Çarka uygulanan kuvveti algılayan yük hücresi ile motor momentinin kontrol paneli üzerinden okunması sağlanmıştır.



Şekil 4.4. Hidrolik dinamometre

Tablo 4.3. Hidrolik dinamometre özellikleri

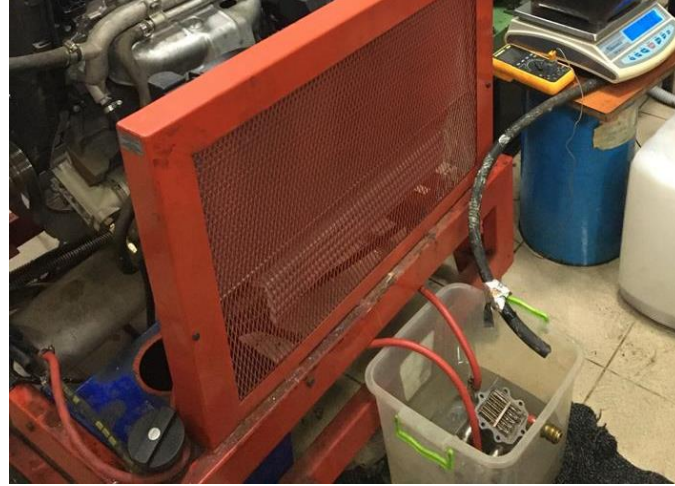
Model	BT-190 FR
Maksimum Güç	100 kW
Maksimum Yük	750 Nm
Maksimum Hız	6000 dev/dk
Yük Ölçümü	Yük Hücresi

Belirlenmiş test koşullarının sağlanabilmesi için Şekil 4.5'te paylaşılan dinamometre kontrol paneli kullanılmıştır. Belirlenen test adımına göre talep edilen motor yükü kontrol paneli üzerinden, motor devri ise gaz pedalı üzerinden ayarlanarak ilgili test adımı gerçekleştirilmiştir. Kontrol paneli üzerinden ayrıca motor yağ sıcaklığı ve motor yağ basıncı izlenerek, tüm test adımlarının, motorun rejime girerek yağ sıcaklığının stabil durumda olması sonrasında gerçekleştirilmesi sağlanmıştır. Test odasının sıcaklık ve nem değerleri anlık olarak KIMO marka nem ve sıcaklık ölçüm cihazı ile kontrol edilmiştir.



Şekil 4.5. Dinamometre kontrol ünitesi

Testler sırasında yakıt tüketim değerleri hassas terazi yardımıyla kütleli olarak ölçülmüştür. Test motoru, belirlenen yük ve devir şartında motor rejime girene kadar çalıştırılmış hassas terazi ve kronometre kullanılarak birim zamandaki yakıt tüketim değerleri hesaplanmıştır. Her bir test şartı için ölçümler en az üç defa tekrar edilmiş ve yapılan ölçüm değerlerinin ortalaması alınmıştır. Yakıt tankına bir eşanjör ilavesi yapılarak yakıt sıcaklığının (35-40°C) stabil kalması amaçlanmıştır. Yakıt ölçüm ve şartlandırma düzeneği Şekil 4.6’da paylaşılmıştır.



Şekil 4.6. Hassas terazi ve yakıt eşanjörü

Testler sırasında motor egzoz emisyonları AVL SESAME marka FTIR model emisyon cihazı ile ölçülmüştür. Ölçüm sonuçları yine AVL firmasına ait OMNIC isimli bilgisayar programı vasıtasıyla işlenmiş ve kaydedilmiştir. Yakıt tüketim değerinde olduğu gibi ölçümler, motorun rejime girmesi beklenerek ve en az üç tekrar alınarak

gerçekleştirilmiştir. Egzoz emisyon cihazının görseli Şekil 4.7’de, ölçüm hassasiyeti Tablo 4.4’te paylaşılmıştır.



Şekil 4.7. Egzoz emisyon ölçüm cihazı

Tablo 4.4. Emisyon cihazı ölçüm hassasiyeti

Parametreler	Birim	Ölçüm Hassasiyeti
THC	ppm	$< \pm \%2$ ölçülen değer veya $< \pm \%1$ tüm değer
CO	ppm	ölçülen değer $\pm \%2$ 'sinden daha iyi
NO _x	ppm	ölçülen değer $\pm \%2$ 'sinden daha iyi

Testler sırasında emme hava debisi AVL marka FLOWSONIX model debimetre ile ölçülmüştür. Tüm yük ve devir şartlarında tüketilen hava miktarı kütsel olarak ölçülmüştür. Hava debisi yardımıyla belirlenen test koşullarındaki hava tüketim değeri kontrol edilmiştir. Ölçüm hata payı %1’den daha düşük olan debimetrenin görseli Şekil 4.8’de paylaşılmıştır.



Şekil 4.8. Hava debisi ölçüm cihazı

Testler sırasında AVL marka FLEXIFEM model veri toplama cihazı kullanılmıştır (Şekil 4.9). Cihaz ile birlikte yine AVL'ye ait INDICOM isimli yanma analizi programı vasıtasıyla motora bağlanan sensörlerden alınan değerler işlenerek kaydedilmiştir.



Şekil 4.9. Yanma ölçüm sistemi

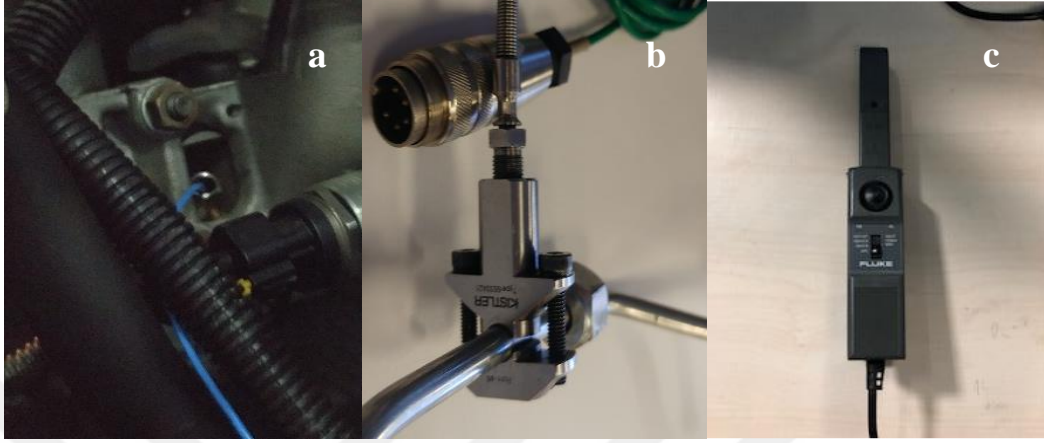
Şekil 4.10'da krank mili açısai hız ölçümü için kullanılan enkoder görseli paylaşılmıştır. Yanma analizini krank açısına bağı olarak ölçmek için motor krank mili kasağına açısai enkoder bağlanmıştır. Enkoderden alınan değerler amplifikatör vasıtasıyla yanma analiz programına aktarılmıştır.



Şekil 4.10. Açısai enkoder

Şekil 4.11'de testler sırasında kullanılan sensör ve ekipmanlar paylaşılmıştır. Silindir içi basınç ölçümü için, kızdırma bujisi yerine takılabilen AVL marka bir basınç sensörü kullanılmıştır. Yakıt hat basıncı ölçümü için KISTLER marka bir basınç sensörü, yakıt hattından çıkarak birinci silindire giden yakıt borusu üzerine

bağlanmıştır. Enjektör sinyalinin okunması için FLUKE marka bir akım kelepçesi kullanılmıştır. Tüm bu sensörler ve bağlantı işlemleri yapıldıktan sonra açılal enkoder yardımıyla motorun üst ölü nokta tayin işlemleri ardından ölçümler gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.11. Ölçüm ekipmanları a) silindir basınç sensörü b) hat basınç sensörü c) akım kelepçesi

4.3. Hesaplanan Değerler ve Analiz Metodolojisi

Bu kısımda, testler sırasında ölçülen değerler ve ölçülen değerler ile hesaplamalar sonucunda oluşturulmuş veriler paylaşılmıştır. Ölçülen ve hesaplanan değerler yardımıyla yapılacak analizlerin metodolojisi açıklanmıştır.

4.3.1. Özgül yakıt tüketimi

Testler sırasında, tüketilen yakıt miktarı hassas terazi ve motor momenti ise yük hücresi yardımıyla ölçülebilmektedir. Motorun gücü ise moment değerleri kullanılarak hesaplanmaktadır. Özgül yakıt tüketimi, yakıt tüketim ve motor güç verileri kullanılarak elde edilmektedir. Özgül yakıt tüketimi, birim güç başına bir saatte tüketilen yakıt miktarıdır;

$$\text{ÖYT} = \frac{m_y}{P_e} \quad (4.1)$$

Bu formülde,

ÖYT= Özgül yakıt tüketimi (g/kWh)

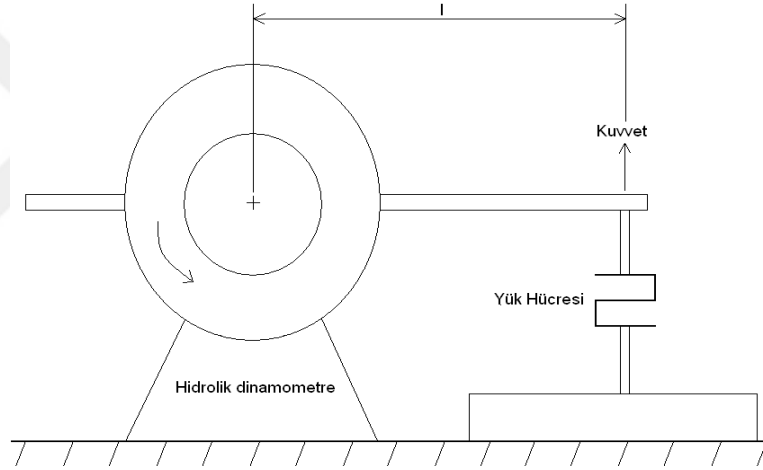
m_y = Yakıt tüketimi (g/h)

P_e =Efektif güç (kW)

olarak ifade edilmektedir.

4.3.2. Motor momenti

Moment, belirli bir eksende bir cismi kuvvet altında döndürme yeteneğidir. Motor momenti, yanma sonucunda oluşan basınç kuvvetinin piston ve biyel kolu üzerinden aktarılarak krank milini aksenal döndürmesi sırasında oluşmaktadır. Motor momenti farklı tipteki hidrolik, DC ve AC (aktif) elektrik motorlar veya bu sistemleri hibrit olarak kullanan dinamometreler yardımıyla ölçülür. Momentin ölçüldüğü eleman yük hücresi (load-cell) ya da tork sensörleri olabilir. Bu tez çalışmasında, hidrolik bir dinamometre ve yük hücresi kullanılarak moment ölçümü gerçekleştirilmiştir. Dinamometrenin rotor mili, kardan mili vasıtasıyla motorun volanına bağlanmıştır. Motor momentinin ölçümünde kullanılan sistemin şematik görseli Şekil 4.12’de paylaşılmıştır.



Şekil 4.12. Motor moment ölçüm şematığı

$$M_d = F \times l \quad (4.2)$$

Bu formülde,

M_d = Motor momenti (Nm)

F = Yük hücresine uygulanan kuvvet (N)

l = Kuvvet noktası ile dinamometre arası mesafe (m)

olarak ifade edilmektedir.

4.3.3. Efektif güç

Efektif güç, yanma sonucunda oluşan indeke güçten, motorun çalışması sırasındaki kayıpları çıkarıldığında elde edilen kullanılabilir güç olarak tanımlanmaktadır. Efektif

güç, motor momenti ve açısal hızın bir fonksiyonudur ve aşağıdaki formülle hesaplanır;

$$P_e = \omega \times M_d \quad (4.3a)$$

Açısal hız, denklemde yerine koyulursa ve birim kW olarak hesaplanırsa;

$$P_e = \frac{\pi \times n}{30} \times M_d \times 10^{-3} \quad (4.3b)$$

$$P_e = \frac{M_d \times n}{9545,58} \quad (4.3c)$$

olarak elde edilir.

Burada;

P_e : Efektif güç (kW)

ω : Açısal hız (rad.s⁻¹)

n : Motor devri (dev/dk)

olarak ifade edilmektedir.

4.3.4. Isı dağılım analizi

Isıl dağılım analizleri, silindir içine konumlandırılmış sensör yardımıyla ölçülen basınç değerleri ile yapılabilmektedir. Analizlerde farklı test şartlarının birbirine göre ve aynı test şartlarında farklı yakıtların performans karşılaştırması yapılabilir. Isı dağılım ve enjektör açılma verileri kullanılarak tutuşma gecikmesi hesaplanabilir. Test motorunun silindir hacmi bilindiği için silindirdeki basınç verileri ile Termodinamiğin 1. Kanunu kullanılarak ısı dağılımı analizi yapılabilir. Termodinamiğin birinci kanunu kullanıldığında:

$$\frac{dU}{dt} = \dot{Q}_t - \dot{W} \quad (4.4)$$

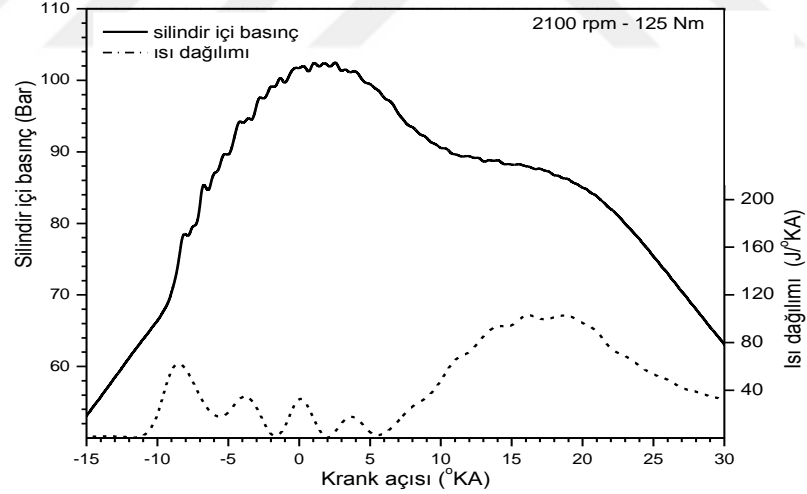
$$\frac{dQ_n}{dt} = \frac{dQ_t}{dt} - \frac{dQ_{wall}}{dt} = P \frac{dV}{dt} + \frac{dU}{dt} \quad (4.5)$$

denklemini yazılır. Bu denklemde; U sistemdeki iç enerjiyi, V piston yer değiştirmesine bağlı hacimi tanımlamaktadır. Toplam ısı dağılımı (\dot{Q}_t) ve silindir duvarlarına olan ısı transferi (\dot{Q}_t), arasındaki fark net ısı dağılımı (\dot{Q}_n) olarak tanımlanır ve piston üzerine

yapılan iş ile iç enerji değişiminin toplamına eşittir. Isı dağılımı, Denklem (4.6) ile hesaplanır [37].

$$\dot{Q}_t = \frac{k}{k-1} P \frac{dV}{d\theta} + \frac{1}{k-1} V \frac{dP}{d\theta} + \dot{Q}_{wall} \quad (4.6)$$

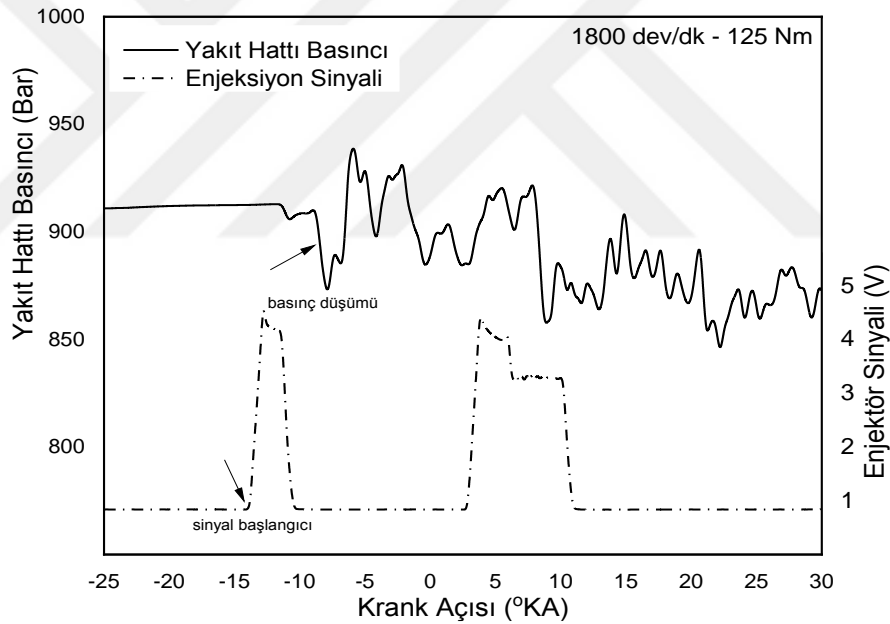
Net ısı dağılım değişimi, toplam ısı dağılım değişimi ve ısı transferi ile silindir duvarları arasında gerçekleşen dağılım değişiminden hesaplanabilir. Aynı zamanda hacmi bilinen silindirde yapılan iş ile iç enerji değişimi de net ısı dağılım değişimine eşittir [38]. Silindir basınç değerleri kullanılarak ısı dağılım analizi yapılabilir. Şekil 4.13'te paylaşılan örnek silindir içi basınç ve ısı dağılım grafiğinden de görüleceği üzere silindir basınç ve ısı dağılım verileri krank mili açısına bağlı olarak gösterilebilmektedir. İtten yanmalı motorlarda tutuşma gecikmesi önemli bir yanma parametresidir. Enjeksiyon başlangıcı ile yanma başlangıcı arasında geçen süre tutuşma gecikmesi olarak tanımlanmaktadır [16, 38]. Tutuşma gecikmesi testler sırasında kullanılan ölçüm ekipmanlarına göre farklı yaklaşımlarla ifade edilebilmektedir.



Şekil 4.13. Örnek silindir içi basınç ve ısı dağılım grafiği

Enjeksiyon başlangıcı, enjektöre gönderilen açılma sinyal verileri kullanılarak tespit edilmiştir. Enjeksiyon başlangıcı tespiti yapılırken enjektörün fiziksel gecikmesi ihmal edilmiştir. Yanma başlangıcı, enjektöre açılma sinyali gönderilmesinin ardından ısı dağılım eğrisinde yükselişin başladığı noktadan tespit edilebilir. Bu iki nokta arasındaki fark tutuşma gecikmesi olarak tanımlanır [39]. Şekil 4.14'te örnek bir enjeksiyon sinyali ve yakıt hat basınç grafiği paylaşılmıştır. Şekilde görüleceği üzere

enjeksiyon sinyalinin başlamasına rağmen yakıt hattındaki basınç düşümü gecikmeli olarak gerçekleşmiştir. Yakıt hattındaki basınç düşüm noktası enjektörün fiziksel olarak açıldığını ve pilot enjeksiyona başladığını göstermiştir. Söz konusu durum gerçekleşirken ray üzerindeki basınç kontrol valfi, ray basıncını sabit tutmaya çalıştığından hat basıncında dalgalanmalar gözlemlenmiştir. Yanma süresi, tutuşma gecikmesine benzer şekilde içten yanmalı motorlarda önemli bir yanma parametresidir. Yanma süresi, yanma başlangıcı ile yanma sonu arasında geçen süre olarak tanımlanır. Yanma başlangıcı ve yanma sonu ısı dağılım eğrisinden tespit edilebilir. Isı dağılım grafiğinde, ısı dağılım oranının pozitif değerde olduğu krank açısı cinsinden geçen süre yanma süresi olarak tanımlanır. Silindir içerisine gönderilen yakıtın krank açısına bağlı olarak yanmış yakıt kesri (KA%) biliniyorsa yanma süresi tayininde bu değer de kullanılabilir [40].



Şekil 4.14. Örnek yakıt hat basıncı ve enjeksiyon sinyali grafiği

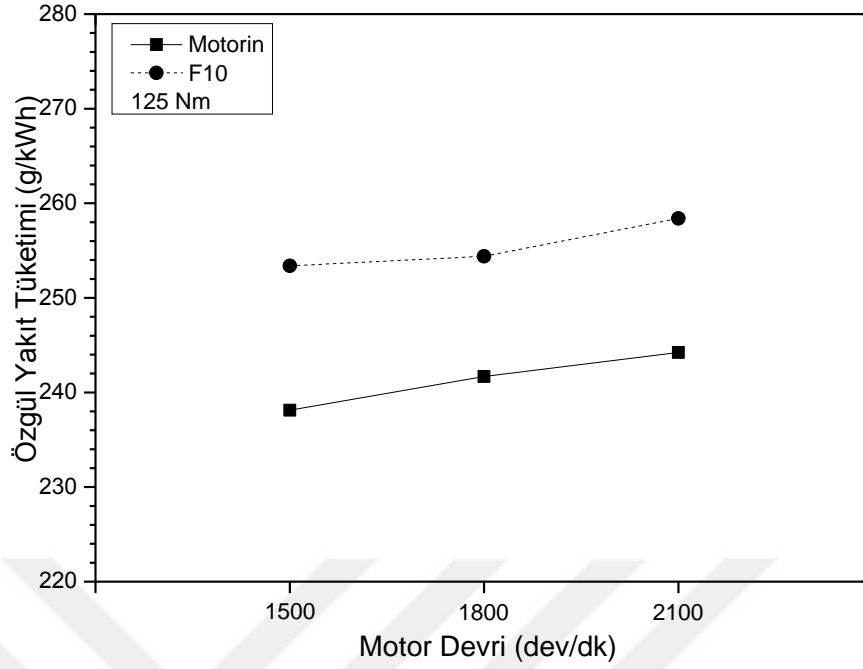
Tutuşma gecikmesi hesabı fiziksel enjeksiyon başlangıcı ve basınç artış oranından referans alınan yanma başlangıcı arasında geçen zamandan da hesaplanabilir. Alternatif olarak silindir içerisine gönderilen yakıtın krank açısına bağlı olarak yanmış yakıt kesri (KA%) biliniyorsa yanma başlangıcı hesaplamak için bu değer de kullanılabilir.

5. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu bölümde, deneysel çalışmalar kapsamında F10 ve motorin yakıtı ile gerçekleştirilen testlerden elde edilen parametreler sunulmuştur. F10 yakıtının, alternatif yakıt olarak kullanılabilirliğini ve motorine göre performans değişimini değerlendirmek üzere yakıt tüketim değeri, pilot ve ana enjeksiyon stratejisi, yakıt hat basıncı, silindir basıncı, ısı dağılımı ve egzoz emisyon değerleri gibi kritik parametreler karşılaştırmalı olarak sunulmuş ve yorumlanmıştır.

5.1. Özgül Yakıt Tüketimi

Özgül yakıt tüketimi (ÖYT), içten yanmalı motorlarda alınan faydalı güce karşılık olarak belirli bir zaman aralığında tüketilen yakıt miktarının ölçüsüdür. Özgül yakıt tüketim değeri, motora gönderilen yakıtın ne kadar verimle yararlı bir işe dönüştürüldüğünün göstergesidir [41]. Yakıt tüketim ölçümüne ek olarak dinamometre yardımıyla şafttan ölçülebilen faydalı güç ile özgül yakıt tüketim değeri hesaplanarak içten yanmalı motorların verimini değerlendirmekte kullanılabilir. Bu deneysel çalışmada, farklı yakıtlarla gerçekleştirilmiş testlerdeki özgül yakıt tüketim değerleri Şekil 5.1’de paylaşılmıştır. Grafikte de görüleceği üzere, hem motorin hem de F10 yakıtının özgül yakıt tüketim değeri sabit motor yükünde (125 Nm) yapılan testlerde devir artışı ile birlikte bir miktar artış göstermektedir. Tüm devir şartlarında F10 yakıtının özgül yakıt tüketim değerlerinin motorin yakıtından ortalama %6 daha fazla olduğu gözlemlenmektedir. Fuzel yağı ile yapılan bazı deneysel çalışmalarda da hem buji ateşlemeli hem de sıkıştırma ateşlemeli motorda referans yakıtta fuzel yağı katkısının artışı ile birlikte özgül yakıt tüketim değerlerinde artış gözlemlenmiştir [15, 19, 20]. Tablo 4.1’de paylaşıldığı üzere fuzel yağının ısıl değeri motorinden yaklaşık %23 oranında daha düşüktür. Söz konusu durum motorine kıyasla F10 yakıtının özgül yakıt tüketim değerinin artmasına neden olmaktadır. Devir artışı ile birlikte F10 yakıtının ÖYT değeri ortalamada %1,2 artış gösterirken, motorinin ÖYT değeri ortalamada %0,8 artış göstermektedir.



Şekil 5.1. ÖYT değerlerinin karşılaştırması

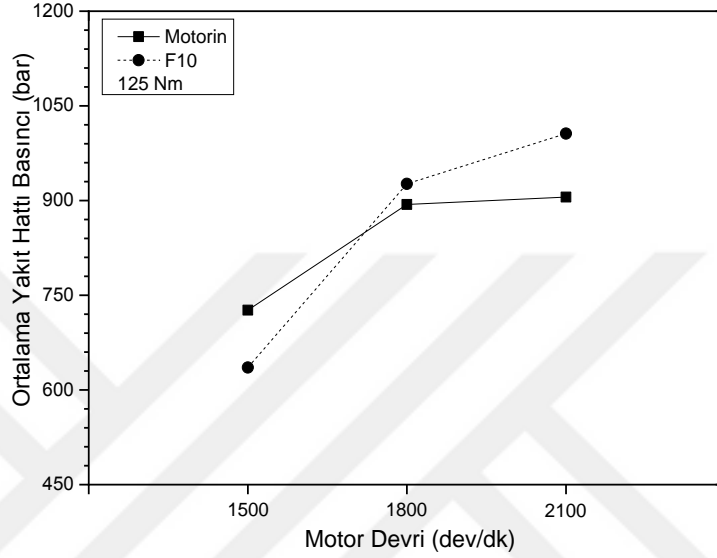
5.2. Enjeksiyon ve Yanma Sonuçları

Dizel motorlarda tork kontrol parametrelerinden biri olan gaz pedal pozisyonuna bağlı olarak enjekte edilen yakıt miktarının kontrol edildiği bilinmektedir. Ancak karşılaştırma yapılacak test yakıtlarındaki farklı kimyasal ve fiziksel özelliklerden dolayı sabit gaz pedal pozisyonu test yakıtlarının karşılaştırmasında tork kontrol parametresi olarak kullanılmamaktadır. Bu durumun nedeni ise aynı yük ve devir şartlarında gaz pedal pozisyonunun ufak değişiklikler gösterebilmesidir. Dolayısıyla bu durum enjeksiyon ve yanma parametrelerini doğrudan etkilemektedir [42, 43].

5.2.1. Yakıt hat basıncı

Yakıt hat basınç sensörü raydan (ortak yakıt hattı) çıkarak enjektöre giden yüksek basınç borusu üzerine konumlandırılmıştır. Motor kontrol ünitesi tarafından enjektöre açılma sinyali gönderilmesiyle yakıt püskürtmesi başlar ve yüksek basınç hattında ani bir basınç düşümü gözlemlenir. Basınç düşümünün başladığı nokta enjeksiyon başlangıcı olarak tanımlanmaktadır. Yakıt hattı basıncı motor devri ve motor yüküne göre değişiklik göstermektedir [44]. Şekil 5.2’de ortalama yakıt hat basınç (OYHB) değerleri paylaşılmıştır. Şekilden de görüleceği üzere devir artışı ile birlikte tüm test yakıtlarında yakıt hattı basınç değeri artmaktadır. F10 yakıtının, ortalama yakıt basıncı

1500 dev/dk'da motorinden %12 daha düşüktür. 1800 ve 2100 dev/dk'da ise F10 yakıtı için ortalama yakıt hattı basıncı motorinden sırasıyla %3 ve %11 daha fazladır. Farklı yakıtlar ile gerçekleştirilen testler sırasında aynı devir ve yük şartlarında gaz pedalında meydana gelen değişiklikler hat basıncında da farklılıkların oluşmasına neden olmaktadır.



Şekil 5.2. OYHB değerlerinin karşılaştırması

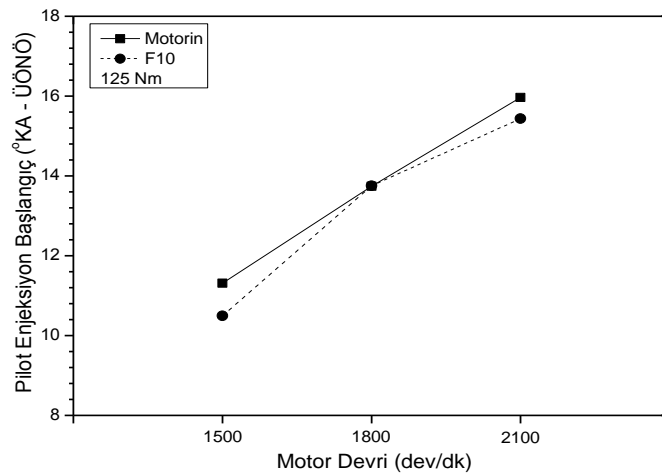
5.2.2. Enjeksiyon stratejisi

Bu tez çalışmada kullanılan test motorunda, tüm test şartları orijinal kalibrasyon haritasında herhangi bir değişiklik yapılmadan gerçekleştirilmiştir. Motor haritası, üst ölü noktadan önce (ÜÖNÖ) yapılan ön (pilot) enjeksiyon ve üst ölü noktadan sonra (ÜÖNS) yapılan ana enjeksiyon olmak üzere 2 adet enjeksiyon stratejisine sahiptir.

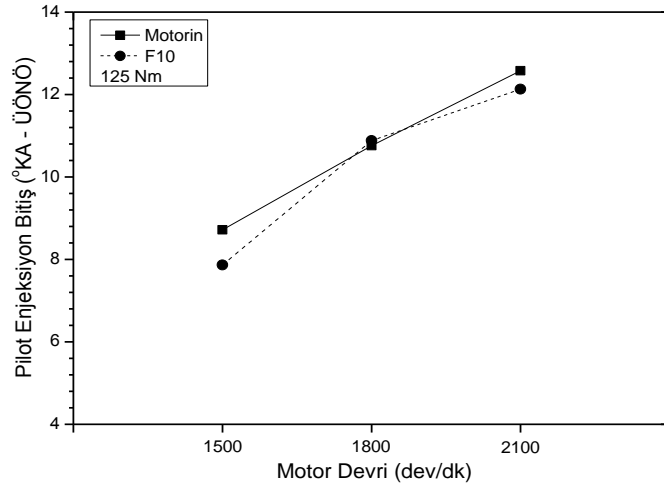
Tüm test yakıtlarının, test koşullarına göre enjeksiyon stratejileri Şekil 5.3-5.9'da paylaşılmıştır. Paylaşılan şekillerden görülebileceği üzere pilot ve ana enjeksiyon stratejileri, kullanılan test yakıtlarına göre farklılıklar göstermektedir. Şekil 5.3'te görüldüğü gibi, tüm test yakıtlarında pilot enjeksiyon başlangıcı (PEB) devir artışı ile birlikte avans yönünde hareket ederek ÜÖN'dan uzaklaşmaktadır. Şekil 5.4'te gösterildiği gibi, pilot enjeksiyon sonu (PES) değeri devir artışı ile birlikte ÜÖN'dan uzaklaşmaktadır. F10 yakıtının hem PEB hem de PES değeri 1500 ve 2100 dev/dk'da motorine göre daha erken başlama ve daha erken sonlanma eğilimi gösterirken 1800 dev/dk'da ise PEB ve PES değeri motorine benzerlik göstermektedir. F10 ve motorin

yakıtının hem PEB hem de PES değeri birbirine oldukça yakındır. Tüm devir şartlarında her iki test yakıtına ait bu değerler arasındaki fark 1 krank açısından ($^{\circ}$ KA) daha küçüktür. Alptekin'in [45] motorin ve motorine belli oranlarda katkı olarak ilave edilen biyodizel, solketal ve etanol ile yapmış olduğu çalışmada da, PEB ve PES değerleri 1500 ve 2000 dev/dk motor hızlarında benzer eğilimler göstermiştir. Şekil 5.5 ve 5.6'da görülebileceği üzere, F10 yakıtı pilot enjeksiyon süresi 1500 dev/dk'da motorine göre daha uzunken, 1800 ve 2100 dev/dk pilot enjeksiyon süresi motorine göre kısalmıştır. Test yakıtlarının ana enjeksiyon sonuçları motor yükü ve devrine göre birbirinden farklı değişimler izlemektedir [46]. Şekil 5.7'de görülebileceği üzere tüm devir şartlarında F10 yakıtı motorine göre ana enjeksiyona daha geç başlamaktadır. Şekil 5.8'de verildiği gibi, F10 yakıtının motorine göre ana enjeksiyon sonu (AES) 1500 dev/dk'da daha geç tamamlanırken, 1800 ve 2100 dev/dk'da benzer krank açıları gerçekleşmektedir. Şekil 5.9 ve 5.10'dan anlaşılacağı üzere; hem motorin hem de F10 yakıtının ana enjeksiyon süresi motor devri artışı ile birlikte mikrosaniye cinsinden azalırken, krank açısı cinsinden artış göstermektedir.

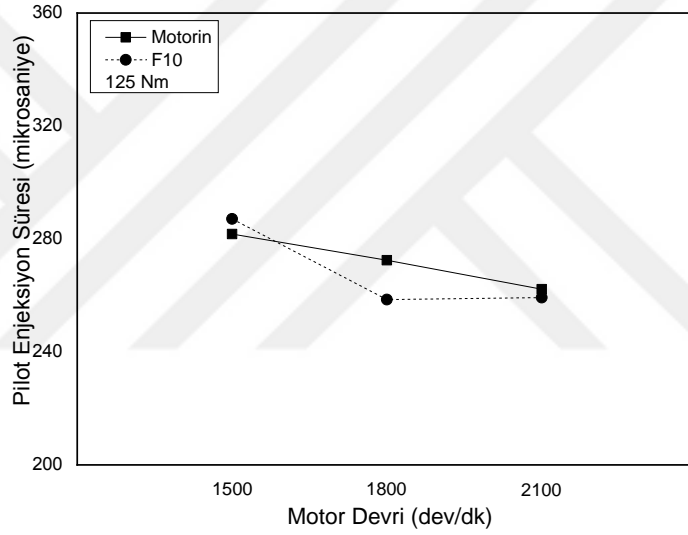
Tüm devir şartlarında her iki yakıt için AEB ve AES değerleri arasındaki fark 1 $^{\circ}$ KA değerinden küçüktür. 1500 dev/dk'da F10 yakıtının mikrosaniye cinsinden ana enjeksiyon süresi motorine göre %0,74 daha uzunken, 1800 ve 2100 dev/dk'da sırasıyla %3,6 ve %3,9 olmak üzere kısalmaktadır. F10 yakıtının motorine göre ana enjeksiyon süresi KA cinsinden değerlendirildiğinde ise 1500 dev/dk %1,3 daha uzunken, 1800 ve 2100 dev/dk'da sırasıyla %2,61 ve %4,7 kısalmaktadır.



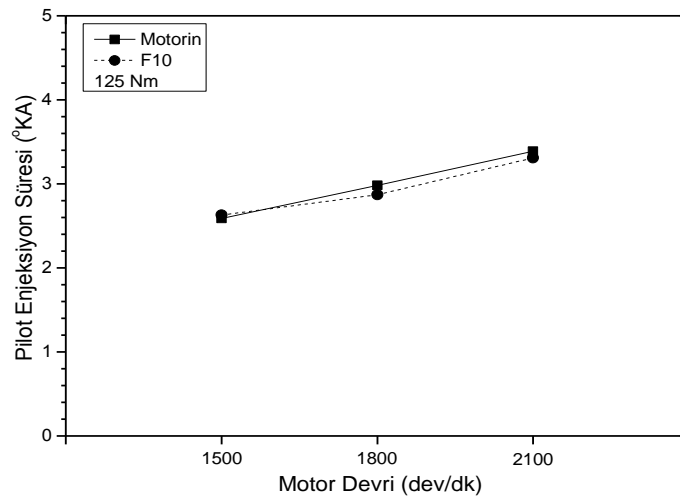
Şekil 5.3. PEB değeri karşılaştırması



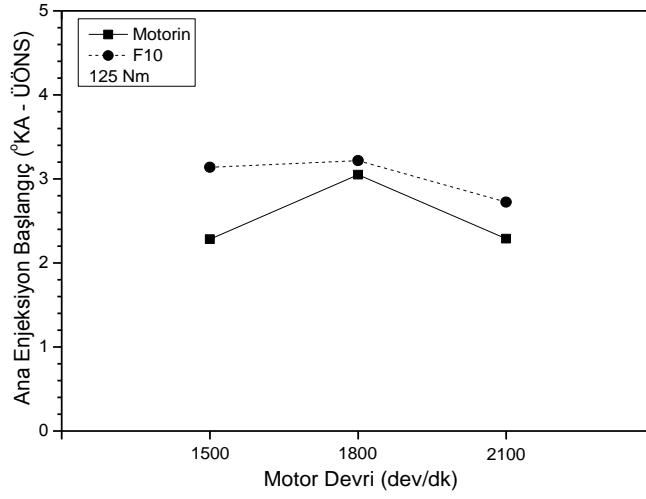
Şekil 5.4. PES değerlerinin karşılaştırması



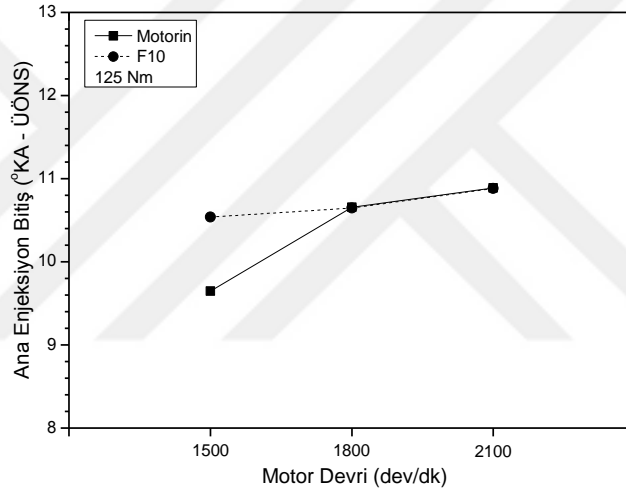
Şekil 5.5. Pilot enjeksiyon süresi karşılaştırması



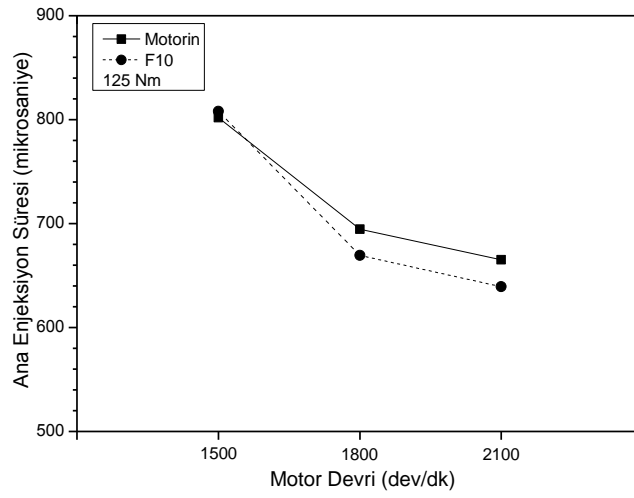
Şekil 5.6. Pilot enjeksiyon süresi karşılaştırması



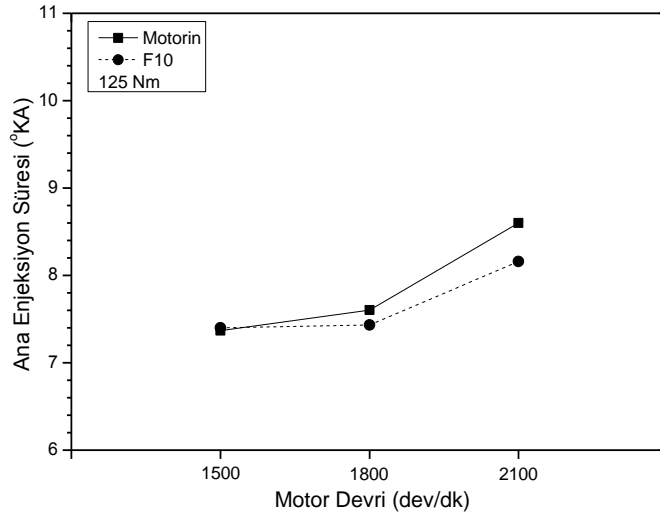
Şekil 5.7. AEB değeri karşılaştırması



Şekil 5.8. AES değeri karşılaştırması



Şekil 5.9. Ana enjeksiyon süresi karşılaştırması



Şekil 5.10. Ana enjeksiyon süresi karşılaştırması

5.2.3. Yanma Karakteristiği

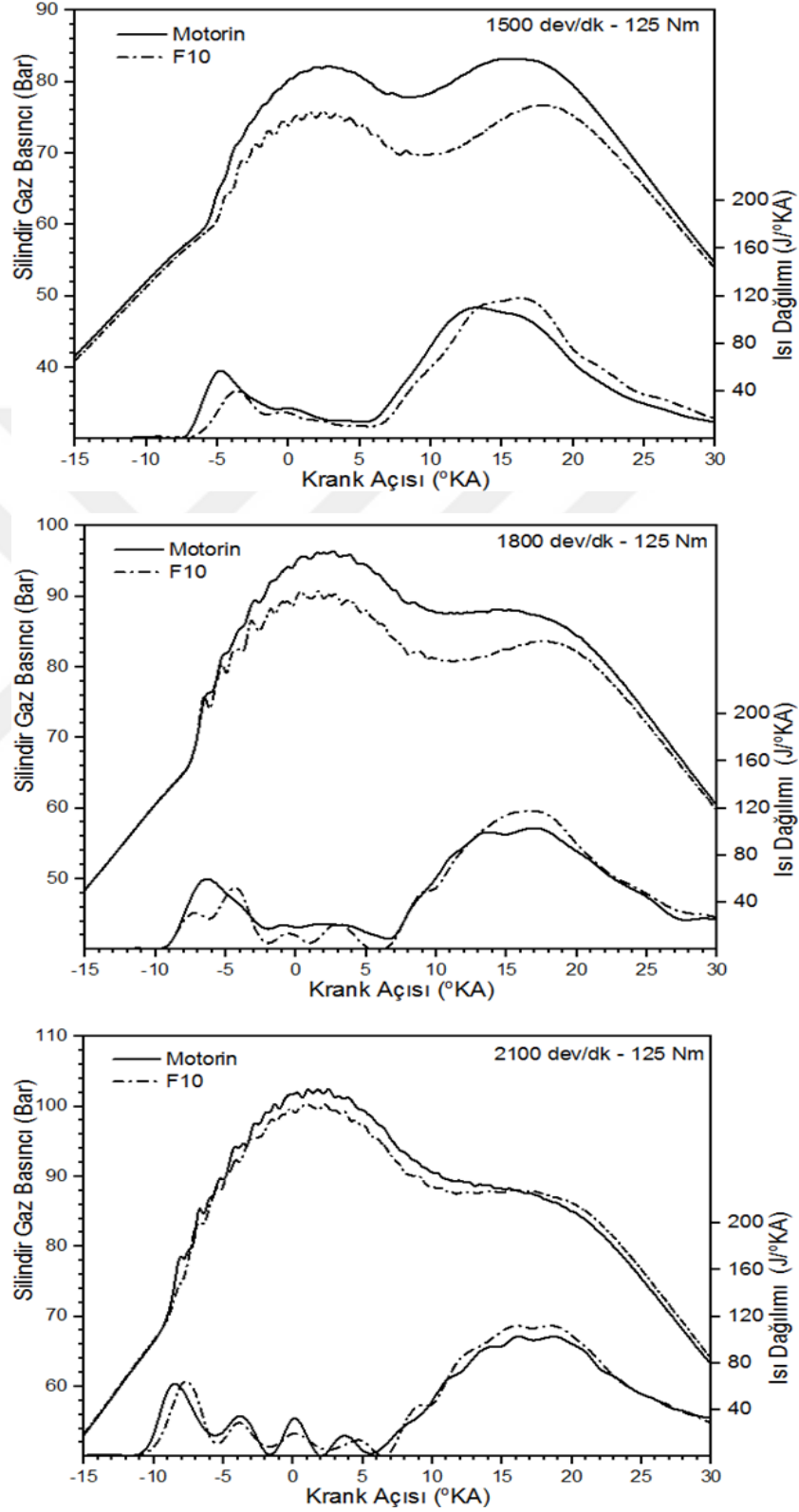
Yanma karakteristiğini belirlemede silindir basınç ve ısı dağılım değerleri, yanma özellikleri hakkında önemli girdiler sağlayabilmektedir. Tüm test yakıtlarının silindir basınç ve ısı dağılım eğilimleri Şekil 5.11’de paylaşılmıştır.

Her iki test yakıtı için silindir gaz basınç değişimi benzer eğilimler sergilemektedir. Devir artışı ile birlikte tüm test yakıtlarının maksimum silindir gaz basınç (MSB) değeri artış göstermektedir. Her iki test yakıtı için de, 1500 dev/dk’da MSB değeri iki pikte birbirine yakın değerler olarak gözlemlenirken, 1800 ve 2100 dev/dk’da MSB değeri birinci pikte elde edilmektedir. F10 yakıtının 1500, 1800 ve 2100’dev/dk’da MSB değeri sırasıyla yaklaşık 76, 90 ve 100 bar iken, motorin yakıtında bu değerler sırası ile 83, 96 ve 102 bar civarındadır. Tüm devir şartlarında F10 yakıtının MSB değeri motorine göre ortalama %5,9 daha düşüktür. Ancak devir artışı ile birlikte F10 yakıtının MSB değeri motorine yaklaşmaktadır. Tüm test yakıtlarında krank açısı cinsinden maksimum silindir basıncının görüldüğü konum devir artışı ile birlikte ÜÖN’ye doğru yaklaşmaktadır. F10 yakıtının düşük MSB değerinin ana nedenlerinden biri olarak Tablo 4.1’den görüleceği üzere fuzel yağının düşük ısıl değere sahip olması olarak düşünülmektedir. Fuzel yağının su içeriğinin motorine göre yüksek olması MSB değerinin düşük olma nedenlerinden bir diğeri olabilir. Fuzel yağının gizli buharlaşma ısısı motorine göre yüksek olduğundan, bu özellik yanma sırasında ortamdan daha fazla ısı çekerek silindir sıcaklığının ve dolayısı ile basıncının düşmesine neden olmuştur [19].

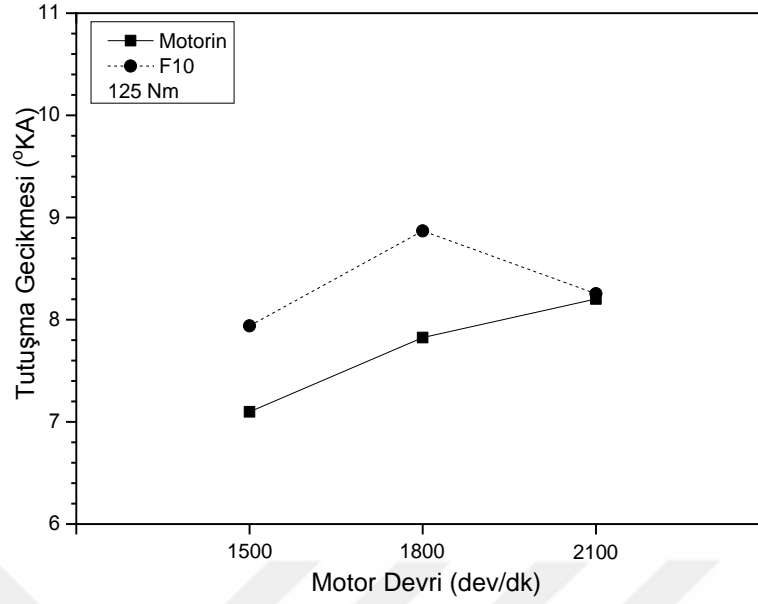
Isı dağılım sonuçları incelendiğinde tüm test yakıtları için tüm devir koşullarında ısı dağılım değişimleri benzer eğilimler göstermektedir. Tüm devir koşulları ve tüm test yakıtlarının maksimum ısı dağılım oranının (MIDO) olduğu krank açısı cinsinden konumları arasındaki farkın 3 °KA değerinden az olduğu gözlemlenmektedir. Isı dağılım oranı büyük oranda tutuşma gecikmesi, setan sayısı ve enjeksiyon süresine bağlıdır [27]. F10 yakıtının MIDO değeri motorinden 1500, 1800 ve 2100 dev/dk'da sırasıyla %7,3, %14,5 ve %5,6 daha yüksektir. F10 yakıtının motorine göre ÖYT değerinin fazla olması MIDO değerlerinin de yüksek olmasını açıklamaktadır. F10 yakıtının tutuşma gecikmesi (TG) süreleri tüm devir şartlarında motorine göre daha uzun olduğundan enerji dağılımındaki artış motorine göre daha geç gerçekleşmektedir. Isı dağılım artış başlangıcı motorin yakıtında devir artışına bağlı olarak krank açısı cinsinden ÜÖN'den avans yönüne doğru uzaklaşmaktadır. F10 yakıtının ısı dağılım artışında ise 1500 dev/dk'dan 1800 dev/dk'ya geçişte benzer uzaklaşma gözlemlenirken 1800 dev/dk'dan 2100 dev/dk'ya geçişte daha stabil kalmaktadır.

Bu çalışmada tutuşma gecikmesi (TG), pilot enjeksiyonun başlangıcı ile yanma başlangıcı arasında geçen krank açısı cinsinden süre olarak belirlenmiştir. Tablo 5.1'de görülebileceği üzere silindir içerisine enjekte edilen yakıtın, yanmış yakıt kesrinin %5'e ulaştığı krank açısı (KA5) yanma başlangıcı olarak tanımlanmıştır. Yanma başlangıcı ve yanma sonu arasında geçen süre ise yanma süresi olarak tanımlanmıştır. Yanmış yakıt kesrinin %90'a ulaştığı krank açısı (KA90) yanma sonu olarak tanımlanmıştır. Şekil 5.12'de tüm test şartları ve tüm test yakıtları için TG değerleri paylaşılmıştır. Tüm devir şartlarında, F10 yakıtının °KA cinsinden TG değeri motorinden ortalama %8,6 daha fazladır. Fuzel yağının motorine göre düşük setan sayısı ve yüksek su içeriği tutuşma gecikmesi değerini artırmaktadır. Junior ve diğ. [28] yaptıkları çalışmada, etanolün buharlaşması sırasında sıcaklığı düşürmesinin bir sonucu olarak etanol katkılı motorin karışımı için tutuşma gecikme süresinin arttığını gözlemlenmiştir. Kullanılan yakıtın setan sayısının çok yüksek olması durumunda tutuşma gecikmesi kısalmaktadır ve bu durumun bir sonucu olarak kabul edilebilir kalitede yanmayı gerçekleştirebilecek karışım oluşturulamadan İYM'nin çevriminde yanma çok erken başlayabilir [39]. Motorin yakıtı ile yapılan testlerde devir artışı ile birlikte tutuşma gecikme süresi krank açısı cinsinden artmaktadır. F10 yakıtı ile

yapılan testlerde ise motor devrinin yükselmesi ile birlikte TG değerinde önce artış sonrasında azalış yönünde bir eğilim gözlemlenmektedir.



Şekil 5.11. Silindir basınç ve ısı dağılımı karşılaştırması



Şekil 5.12. Tutuşma gecikmesi karşılaştırması

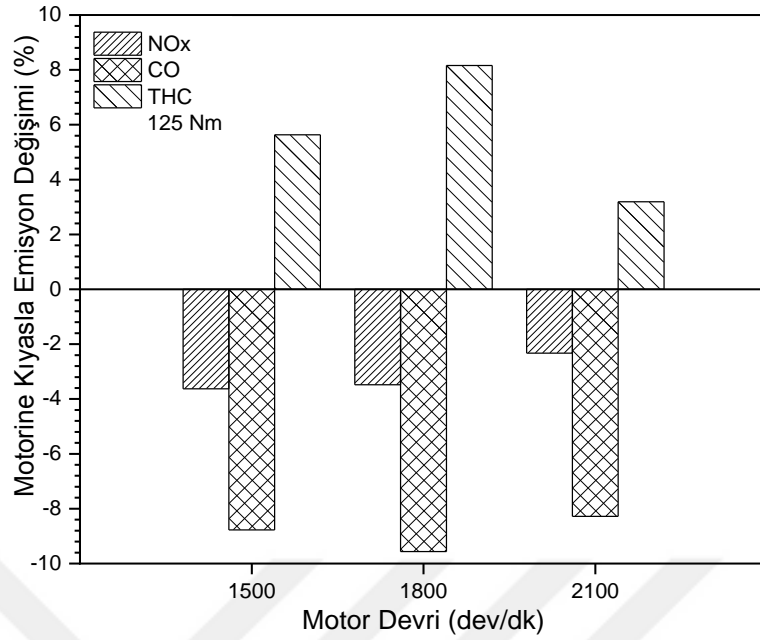
Tablo 5.1. Enjeksiyon ve yanma sonuçları

Yakıt	Motor Devri (dev/dk)	Motor Torku (Nm)	PEB (°KA ÜÖNÖ)	KA5 (°KA ÜÖNÖ)	TG (°KA)	KA90 (°KA ÜÖNS)	Yanma Süresi (°KA)
Motorin	1500	125	11,30	4,21	7,09	33,57	37,78
Motorin	1800	125	13,75	5,95	7,82	32,9	38,85
Motorin	2100	125	15,96	7,76	8,20	37,8	45,56
F10	1500	125	10,49	2,55	7,94	34,35	36,9
F10	1800	125	13,75	4,89	8,86	34,65	39,54
F10	2100	125	15,43	7,18	8,25	37,46	44,64

Sonuç olarak, motorda kullanılan yakıt cinsine bağlı olarak benzer devir ve tork şartlarında pedal oranı değişebilmektedir. Pedal oranındaki bu değişim sonucunda motor kontrol ünitesi yakıt tipine bağlı olarak farklı enjeksiyon ve yanma karakteristikleri göstermektedir. Dolayısıyla yakıt özellikleri yakıt basıncına, enjeksiyon süresine, silindirlere gönderilen yakıt miktarına ve bu parametrelerin bir sonucu olarak Tablo 5.1’de görüleceği üzere enjeksiyon stratejisine ve yanma performansına etki etmektedir.

5.3. Egzoz Emisyonları

Bu deneysel çalışmada motorun NO_x, CO ve THC emisyon değerleri AVL SESAME FTIR cihazı ile ölçülmüştür. F10 yakıtının motorine göre NO_x, CO ve THC emisyon oranı değişimi Şekil 5.13’de gösterilmiştir.



Şekil 5.13. Egzoz emisyonlarının karşılaştırılması

Karbonmonoksit (CO) emisyonu içten yanmalı motorlarda kullanılan yakıtın oksijen miktarı, yanma sıcaklığı ve yanma süresi parametrelerine bağlı olarak oluşabilecek önemli emisyonlardan biridir. CO emisyonu eksik bir yanma ürünü olduğundan kimyasal enerji kaybının göstergesi olarak değerlendirilir [36]. Bu tez çalışmasında, F10 yakıtı tüm devir şartlarında motorine göre egzozdan daha düşük CO emisyonu yaymaktadır. F10 yakıtının motorine göre CO emisyon değişimi 1500, 1800 ve 2100 dev/dk'da sırasıyla %8,77, %9,56 ve %8,27 olmuştur. Yanma reaksiyonları sırasında kullanılan yakıtın oksijen içeriği de yanma reaksiyonunu etkileyebilmektedir. Dolayısıyla motorine göre daha yüksek oksijen içeriğine sahip olan F10 yakıtı silindir içerisindeki yanma reaksiyonunu etkileyerek CO emisyonlarının oluşumunda azalma sağlamıştır.

Fuzel yağının yüksek oksijen içeriği CO emisyonlarının azalmasında önemli bir etki göstermiştir [19, 36]. Hava yakıt oranı CO emisyonunu etkileyen önemli parametrelerden bir diğeridir [47]. Tablo 5.2'den de görüleceği üzere hava tüketim miktarı devir artışı ile birlikte artmaktadır. 1800 dev/dk'dan 2100 dev/dk'ya geçişteki CO değişiminin, 1500 dev/dk'dan 1800 dev/dk'ya geçişteki CO değişimine oranla daha az olması CO emisyonlarının hava tüketim değerlerine ilave olarak yanma sıcaklığı ve yanma süresinden de etkilenebileceğini göstermektedir.

Tablo 5.2. Hava tüketim değeri karşılaştırması

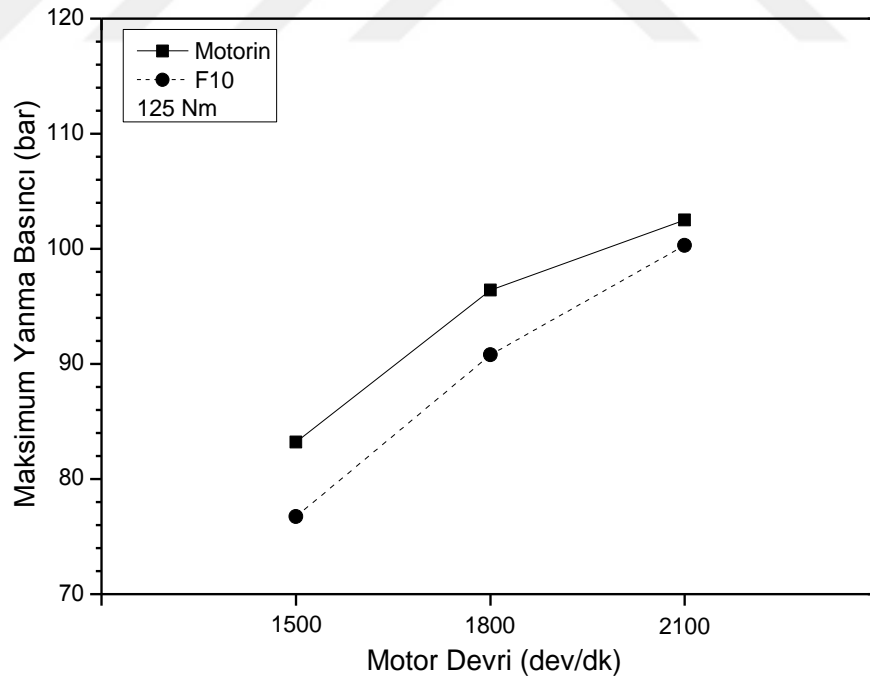
Motor Devri (dev/dk)	Motor Torku (Nm)	Motorin Hava Tüketimi (kg/h)	F10 Hava Tüketimi (kg/h)
1500	125	102,4	101,1
1800	125	131,5	132,7
2100	125	166,1	170,3

Toplam hidrokarbon emisyonları (THC), silindir içerisine enjekte edilen yakıtın tamamen yanmaması sonucunda oluşmaktadır. Silindir içerisindeki eksik yanmanın bir sonucu olarak oluşan çığ durumdaki yanmamış hidrokarbonların ve kısmi olarak yanmış hidrokarbonların bütünü toplam hidrokarbon emisyonlarını oluşturmaktadır. İçten yanmalı motorlarda kullanılan yakıt türü, motor çalışma şartları, emme ve egzoz port geometrisi ve yanma odası geometrisi hava-yakıt karışımını ve dolayısıyla yanmayı etkileyecek tüm parametreler hidrokarbon oluşumunda etkilidir. Bu tez çalışmasında, F10 yakıtının motorine göre tüm devir şartlarında daha yüksek toplam hidrokarbon emisyonu oluşturduğu gözlemlenmiştir. F10 yakıtının motorine göre hidrokarbon emisyon değişimi 1500, 1800 ve 2100 dev/dk'da sırasıyla %5,63, %8,15 ve %3,18'dir. F10 yakıtının yüksek su içeriği nedeniyle yanma kalitesi etkilenmektedir. Bu duruma ek olarak tutuşma gecikmesinin uzaması hidrokarbon oluşumunun artmasına neden olmaktadır [36]. Önceki kısımlarda belirtildiği gibi, F10 yakıtının maksimum silindir basıncının da daha düşük olduğu görülmektedir. F10 yakıtının motorine göre maksimum silindir basınç değerinin düşük olması, daha yüksek oranda hidrokarbon oluşumunun ana nedenlerinden biridir [43]. 1500 dev/dk'dan 1800 dev/dk'ya geçişte, 1800 dev/dk'dan 2100 dev/dk'ya geçişe göre F10 yakıtının motorine göre hem silindir basıncındaki hem de tutuşma gecikmesindeki fark daha büyüktür. Bu durumun sonucu olarak, söz konusu devir geçişlerinde motorine göre hidrokarbon değişim oranı önce artış sonrasında ise azalış göstermektedir.

Azotoksit emisyonları (NO_x), yanma sırasında azot ile oksijenin yüksek sıcaklıkta reaksiyona girmesiyle oluşan zararlı ve istenmeyen egzoz emisyonudur. NO_x oluşumu silindir içerisinde 1500 °C sıcaklıklar üzerinde meydana gelir ve sıcaklık artışı ile birlikte NO_x oluşum hızı artar [48]. NO_x emisyonlarını büyük oranda NO emisyonu daha az oranda ise NO₂ emisyonu oluşturur. Motor çalışma koşulları, yanma sonundaki silindir basınç ve sıcaklık değeri, hava-yakıt oranı ve silindire püskürtülen yakıtın

yanma süresi NO_x emisyonlarını etkileyen ana parametrelerdendir [49]. Yapılan testler sonucunda, F10 yakıtının motorine göre tüm devir şartlarında daha düşük NO_x emisyonu sağladığı tespit edilmiştir. F10 yakıtının motorine göre NO_x emisyon değişimi 1500, 1800 ve 2100 dev/dk'da sırasıyla %3,62, %3,47 ve %2,32'dir. Fuzel yağının yüksek oksijen içeriğine rağmen, F10 yakıtı ile yapılan testlerde motorine oranla NO_x emisyonları daha düşük mertebelerde seyretmektedir. Tablo 4.1'de belirtildiği üzere, fuzel yağının yüksek su içeriği ve düşük ısıl değeri nedeniyle F10 yakıtının motorine oranla daha düşük silindir içi basınç ve sıcaklık değeri oluşturduğu gözlemlenmektedir. Silindir içindeki düşük basınç ve sıcaklık değeri NO_x oluşumunu azaltmıştır [19].

Motor devri artışı ile birlikte F10 yakıtının motorine kıyasla emisyon değişimi azalmaktadır. Devir artışına bağlı olarak F10 yakıtının silindir basıncındaki yükselme ve Şekil 5.14'de paylaşılan maksimum silindir basınç değerinin motorine yaklaşması nedeniyle motorine kıyasla NO_x emisyon farkının azalış eğilimine girdiği gözlemlenmektedir.



Şekil 5.14. Maksimum silindir basınç karşılaştırması

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Dünya ve Türkiye’de birincil enerji talebi içerisindeki en büyük pay fosil yakıtlara aittir. Nüfus artışı kendi başına enerji talebinin artmasına neden olurken nüfus artışı ile birlikte motorlu araçların sayısındaki artış ulaşım sektöründe kullanılan enerji talebini de artırmaktadır. Fosil yakıtlara olan bağımlılığın azaltılması ve fosil yakıtların çevreye olan zararlı etkilerini elimine edebilmek için yenilenebilir alternatif yakıt arayışı gereksinimi oluşmuştur. Fuzel yağı, şeker üretimi sırasında yan ürün olan melastan alkol üretimi sırasında ortaya çıkan yenilenebilir bir yan üründür. Bu bağlamda, fuzel yağının temiz bir çevre için motorine alternatif yakıt ya da yakıt katkısı olarak kullanılması değerlendirilebilir. Bu yoldan hareketle bu tez çalışmasında, fuzel yağı saf motorine %10 katkı olarak kullanılarak 1500, 1800 ve 2100 dev/dk motor devirlerinde ve sabit motor yükünde (125 Nm) CRDI sisteme sahip dizel bir motorda test edilmiştir.

Test sonuçları incelendiğinde; F10 yakıtının ÖYT değerlerinin tüm test devirlerinde motorinden daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. F10 yakıtının ÖYT değeri motorine göre tüm devir şartlarında ortalama %6 daha fazladır. Devir artışına bağlı olarak her iki test yakıtının ÖYT değerlerinin bir miktar artış gösterdiği tespit edilmiştir.

Tüm test yakıtlarının maksimum ve ortalama yakıt hat basınç değerlerinin devir artışı ile yükseldiği belirlenmiştir. F10 ve motorin yakıtının maksimum yakıt hattı basınç değerleri 2100 dev/dk’da sırasıyla 1070 ve 962 bar olarak tespit edilmiştir. Test yakıtlarının yakıt hattı basıncı değerlerinde aynı devir ve yük koşulunda birbirinden farklı davranışlar gözlemlenmiştir.

Pilot ve ana enjeksiyon stratejilerinde, kullanılan test yakıtlarına göre farklılıklar tespit edilmiştir. Devir artışı ile birlikte tüm test yakıtlarında PEB değerinin ÜÖN’den avans yönüne, PES değerinde ise ÜÖN’den rötör yönüne doğru uzaklaştığı gözlemlenmiştir. Test yakıtlarının PEB ve PES değerleri arasındaki farkın tüm devir şartlarında 1 °KA’dan daha az olduğu belirlenmiştir. F10 yakıtının motorine göre ana enjeksiyona tüm devir şartlarında daha geç başladığı tespit edilmiştir. Her iki test yakıtında ana

enjeksiyon süresinin devir artışına bağlı olarak mikrosaniye cinsinden azaldığı, krank açısı cinsinden ise arttığı görülmüştür.

Her iki test yakıtında da silindir gaz basınç eğrisinin benzer eğilimler izlediği tespit edilmiştir. Devir artışına bağlı olarak tüm test yakıtlarında MSB değerinin arttığı belirlenmiştir. F10 yakıtının tüm devir koşullarında motorine göre ortalamada %5,5 daha düşük MSB değeri oluşturduğu ve devir artışına bağlı olarak MSB değerinin motorine yaklaştığı tespit edilmiştir. Tüm test yakıtlarında, MSB'nin krank açısı cinsinden konumunun devir artışı ile birlikte ÜÖN'ye yaklaştığı görülmüştür. Her iki test yakıtında, ısı dağılım değişimlerinin benzer eğilimler gösterdiği belirlenmiştir.

Tüm devirlerde F10 yakıtının motorine göre MIDO değerinin ortalamada %9,4 fazla olduğu tespit edilmiştir. Tüm devir koşullarında F10 yakıtının tutuşma gecikmesinin ise motorine kıyasla ortalama olarak %8,6 daha uzun olduğu görülmüştür.

F10 yakıtının tüm devir şartları ortalamasında motorine kıyasla NO_x ve CO emisyon oluşumunu sırasıyla %3,1 ve %8,8 oranında azaltıcı, TCH emisyon oluşumunu ise %5,6 oranında artırıcı etkiye sahip olduğu tespit edilmiştir. F10 yakıtının motorine kıyasla devir değişikliği ile birlikte söz konusu emisyonların azalış ya da artış oranları arasında değişkenliğin olduğu fark edilmiştir. F10 yakıtı ile yapılan testlerde NO_x emisyonlarının motorine göre değişiminin devir artışına bağlı olarak azaldığı tespit edilmiştir. CO emisyonlarının değişiminde 1500 dev/dk'dan 1800 dev/dk'ya geçişte artış 1800 dev/dk'dan 2100 dev/dk'ya geçişte ise azalış olduğu tespit edilmiştir. THC emisyonlarının değişiminde de CO emisyonlarının değişimine benzer bir davranış gözlemlenmiştir.

Sonuçlar genel olarak değerlendirildiğinde, F10 yakıtının NO_x ve CO emisyonlarını azaltmada önemli bir etkisinin olduğu tespit edilmiştir. Şu unutulmamalıdır ki; tüm testler motor kontrol ünitesinin orijinal yazılımı ile herhangi bir müdahale olmadan gerçekleştirilmiştir. İleride yapılacak olan araştırmalarda, farklı karışım oranlarıyla daha geniş yük aralığında testlerin yapılması ve enjeksiyon parametrelerinin değiştirilmesi ile optimum yakıt tüketimi değerleri ve emisyonların araştırılması önerilmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] <https://www.tpao.gov.tr/file/2005/2019-tpao-sektor-raporu-3185ed3b4af5442c.pdf>, (Ziyaret Tarihi : 01 Kasım 2020).
- [2] <https://assets.kpmg/content/dam/kpmg/tr/pdf/2019/03/sektorel-bakis-2019-enerji.pdf>, (Ziyaret Tarihi : 12 Kasım 2020).
- [3] <https://www.globalfirepower.com/proven-oil-reserves-by-country.asp>, (Ziyaret Tarihi : 25 Aralık 2020).
- [4] <https://najauto.com/market-news/how-many-cars-are-there-in-the-world-7100>, (Ziyaret Tarihi : 25 Aralık 2020).
- [5] Grujic İ., Doric J., Stojonavic N., Abdullah O., Numerical Analysis of Hydrogen Fueled IC Engine, *19th Conference on Thermal Science and Engineering of Serbia*, Sokobenja, Serbia, 22-25 Ekim 2019.
- [6] <https://data.tuik.gov.tr/Kategori/GetKategori?p=ulastirma-ve-haberlesme-112&dil=1>, (Ziyaret Tarihi : 15 Ekim 2020).
- [7] <https://dieselnet.com/standards/eu/ld.php#stds>, (Ziyaret Tarihi : 15 Ekim 2020).
- [8] Wetherill, C.M., Examination of Fusel Oil from Indian Corn and Rye, *Journal of the Franklin Institute*, 1853, **55**(6), 385-391.
- [9] Güvenç, A., Aydoğan, Ö., Kapucu, N., Mehmetoğlu, Ü., Fuzel Yağından İzoamil Asetat Üretimi, *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 2007, **22**(4), 801-808.
- [10] İçingür Y., Calam A., Fuzel Yağı Benzin Karışımlarının Buji ile Ateşlemeli bir Motorda Performans ve Emisyonlara Etkisi, *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 2012, **27**(1), 143-149.
- [11] The Symptoms of Poisoning by Fusel Oil, *The Lancet*, 1901, **158**(4070), 606.
- [12] Lettinga G., Zeeuw W., Ouborg E., Anaerobic Treatment of Wastes Containing Methanol and Higher Alcohols, *Water Research*, 1981, **15**(2), 171-182.
- [13] Kunkee R., Snow S.R., Rous C., 4374859 Method for Reducing Fusel Oil in Alcoholic Beverages and Yeast Strain Useful in that Method, *Biotechnology Advances*, 1983, **1**(1), 148-149.

- [14] Salis, A., Pinna, M., Monduzzi, M, ve Solinas, V., Biodiesel Production from Triolein and Short Chain Alcohols Through Biocatalysis, *Journal of Biotechnology*, 2005, **119**(3), 291-299.
- [15] Özer S., Pirina Yağından Fuzel Yağı ile Biyodizel Üretimi ve Dizel Motor Performans ve Emisyonlarına Etkisi, Doktora Tezi, Karabük Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük, 2015, 382974.
- [16] Calam A., Solmaz H., Uyumaz A., Polat S., Yılmaz E., İçingür Y., Investigation of Usability of the Fusel Oil in a Single Cylinder Spark Ignition Engine, *Journal of the Energy Institute*, 2015, **88**(3), 258-265.
- [17] Solmaz H., Combustion, Performance and Emission Characteristics of Fusel Oil in a Spark Ignition Engine, *Fuel Processing Technology*, 2015, **133**(1), 20-28.
- [18] Demirkul M., Buji İle Ateşlemeli Motorlarda Benzin, Etanol ve Fuzel Yağı Karışımları Kullanılarak Motor Performansı ve Egzoz Emisyonlarına Etkilerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2015, 395787.
- [19] Awad O., Mamat R., Ali O., The Effect of Adding Fusel Oil to Diesel on The Performance and The Emissions Characteristics in a Single Cylinder CI Engine, *Journal of the Energy Institute*, 2017, **90**(3), 382-396.
- [20] Awad O., Mamat R., İbrahim T. K., Effects Of Fusel Oil Water Content Reduction on Fuel Properties, Performance and Emissions of SI Engine Fueled with Gasoline -Fusel Oil Blends, *Renewable Energy*, 2016, **118**(1), 858-869.
- [21] Şimsek S., Fuzel Yağı Özelliklerinin İyileştirilmesi ve Buji Ateşlemeli bir Motorda Farklı Sıkıştırma Oranlarında Kullanımının Performans ve Emisyonlara Etkisinin İncelenmesi, Doktora Tezi, Karabük Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük, 2018, 513507.
- [22] Yılmaz E., Investigation of The Effects of Diesel-Fusel Oil Fuel Blends on Combustion, Engine Performance and Exhaust Emissions in a Single Cylinder Compression Ignition Engine, *Fuel*, 2019, **255**(1), 1-8.
- [23] Calam A., Effects of The Fusel Oil Usage in HCCI Engine on Combustion, Performance and Emission, *Fuel*, 2020, **262**(1), 1-9.
- [24] Wei L., Geng P., A Review on Natural Gas/Diesel Dual Fuel Combustion, Emissions and Performance, *Fuel Processing Technology*, 2016, **142**(1), 264-278.
- [25] Haşimoğlu C., İçingür Y., Özsert İ., Turbo Şarjlı Bir Dizel Motorda Yakıt Olarak Biyodizel Kullanılmasının Motor Performans ve Egzoz Emisyonlarına Etkisi, *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 2008, **23**(1), 207-213.

- [26] Çırak B., Korçak S., Yörük A., Çitlembik Yağı Biyodizelinin Motor Performansı ve Emisyonlarına Etkisi, *Batman Üniversitesi Yaşam Bilimleri Dergisi*, 2016, **6**(2), 117-132.
- [27] M.S. Kumar, A. Ramesh, B. Nagalingam, An Experimental Comparison of Methods to Use Methanol and Jatropha Oil in a Compression Ignition Engine, *Biomass Bioenergy*, 2003, **25**(1), 309-318.
- [28] Junior R.F.B., Martins C.A., Emission Analysis of a Diesel Engine Operating in Diesel-Ethanol Dual-Fuel Mode, *Fuel*, 2015, **148**(1), 191-201.
- [29] Mayer F.D., Feris N.E., Marcilio R., Influence of Fusel Oil Components on the Distillation of Hydrous Ethanol Fuel (Hef) in a Bench Column, *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 2015, **32**(2), 585-593.
- [30] Kirk R.E., Othmer D.F., Encyclopedia of Chemical Technology, 2nd ed., Wiley, New York, 1992.
- [31] Patil, A.G., Koolwal, S.M., Butala, H.D., Fusel Oil: Composition, Removal and Potential Utilization, *International Sugar J.*, 2002, **104**(1), 51-58.
- [32] Harland, J.I., Jones C.K., Hufford C., *Sugar Beet*, Coproducts, Blackwell Publishing, UK, 2006.
- [33] Welsh, F.W., Williams, R.E., Lipase Mediated Production of Flavor and Fragrance Esters from Fusel Oil, *Journal of Food Science*, 1989, **54**(6), 1565-1568.
- [34] Özer S., Aktaş A., Biyodizel Reaksiyonlarında Fuzel Yağı Kullanımı, 2. *Uluslararası Mühendislik ve Bilim Alanında Yenilikçi Teknolojiler Sempozyumu*, Karabük, Türkiye, 18-20 Haziran 2014.
- [35] Erdem F., Durukan E., Fuzel Yağının Fraksiyonlarına Ayrılması ve Değerlendirilmesi, *Türk Şeker Fabrikaları Şeker Enstitüsü, Şeker Enstitüsü Raporu*, 1991.
- [36] Ağbulut Ü., Sarıdemir S., Karagöz M., Experimental Investigation of Fusel Oil (Isoamyl Alcohol) and Diesel Blends in a CI Engine, *Fuel*, 2020, **267**(1), 1-8.
- [37] Alptekin E., Biyodizel İle Dizel Yakıtlarının Harmanlanmasında Yakıt Özelliklerinin Belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 2007, 232659.
- [38] Heywood J.B., *Internal Combustion Engines Fundamentals*, 2nd Series, McGraw-Hill Co, New York, 1988.
- [39] Labeckas G., Slavinkas S., Kanepkine I., The Individual Effects of Cetane Number, Oxygen Content or Fuel Properties on The Ignition Delay, Combustion Characteristics, and Cyclic Variation of a Turbocharged CRDI Diesel Engine – Part 1, *Energy Conversion and Management*, 2017, **148**(1), 1003-1027.

- [40] Hosseini V., Checkel M.D., Using Reformer Gas to Enhance HCCI Combustion of CNG in a CFR Engine, *Powertrain & Fluid Systems Conference & Exhibition*, Toronto, Canada, 16-19 Ekim 2006.
- [41] Ashok B., Nanthagopal K., Eco Friendly Biofuels for CI Engine Applications, *Advances in Eco-Fuels for a Sustainable Environment*, 2019, 407-440.
- [42] Han D, Duan Y, Wang C, Lin H, Huang Z, Wooldridge MS. Experimental Study of The Two-Stage Injection Process of Fatty Acid Esters on a Common Rail Injection System, *Fuel*, 2016, **163**(1), 214–22.
- [43] Türkcan A., Effects of High Bioethanol Proportion in The Biodiesel-Diesel Blends in a CRDI Engine, *Fuel*, 2017, **223**(2018), 53-62.
- [44] Tziourtzioumis D., Stamatelos A., Effects of a 70% Biodiesel Blend on The Fuel Injection System Operation During Steady-State and Transient Performance of a Common Rail Diesel Engine, *Energy Conversion and Management*, 2012, **60**(1), 56-67.
- [45] Alptekin E., Emission, Injection and Combustion Characteristics of Biodiesel and Oxygenated Fuel Blends in a Common Rail Diesel Engine, *Energy*, 2017, **119**, 44-52.
- [46] Alptekin E., Şanlı H., Çanakçı M., Combustion and Performance Evaluation of a Common Rail DI Diesel Engine Fueled with Ethyl and Methyl Esters, *Applied Thermal Engineering*, 2019, **149**(1), 180-191.
- [47] Pulkrabek W.W., *Engineering Fundamentals Of The Internal Combustion Engine*, 1st ed., Prentice Hall, New Jersey, 1997.
- [48] Cybulski A., Moulijn J.A., *Structured Catalysts and Reactors*, e-book, CRC Press, Florida, 2005.
- [49] Hokeman S.K., Robbins C., Review of the Effects of Biodiesel on NOx Emissions, *Fuel Processing Technology*, 2012, **96**(1), 237-249.

KİŞİSEL YAYINLAR VE ESERLER

- [1] **Özgün B.**, Alptekin E., CRDI Bir Dizel Motorda Fuzel Yağının Motor Performans ve Yanma Karakteristiklerine Etkisi, *5. Uluslararası Marmara Fen Bilimleri Kongresi*, Kocaeli, Türkiye, 04-05 Aralık 2020.



ÖZGEÇMİŞ

İlk, orta ve lise eğitimini Gümüşhane’de tamamladıktan sonra 2013 yılında Kocaeli Üniversitesi Otomotiv Mühendisliği bölümünde eğitimine devam etti. 2017 yılında lisans eğitimini tamamlayarak aynı bölümde yüksek lisans eğitimine başladı. Yüksek lisans eğitimi ile eş zamanlı olarak Anadolu Motor’da Ar-Ge mühendisi olarak çalışmaya başladı. Çalışma hayatına 2019 yılı itibarıyla BMC Power firmasında tasarım doğrulama ve test mühendisi olarak devam etmektedir.

