



**T.C.
BATMAN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**DİETİLETER VE ASPİR YAĞI BİYODİZELİ KARIŞIMININ BİR LPG
RCCI MOTORUNUN ORTA YÜKLERİNDEKİ YANMA PERFORMANS VE
EMİSYON DAVRANIŞININ DENEYSEL OLARAK ARAŞTIRILMASI**

**Ali İhsan ÜLGEN
YÜKSEK LİSANS TEZİ
Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Nisan 2023
BATMAN
Her Hakkı Saklıdır**

TEZ KABUL VE ONAYI

Ali İhsan ÜLGEN tarafından hazırlanan “DİETİLETER VE ASPIR YAĞI BİYODİZELİ KARIŞIMININ BİR LPG RCCI MOTOR ORTA YÜKLERDEKİ YANMA PERFORMANS VE EMİSYON DAVRANIŞININ DENEYSEL OLARAK ARAŞTIRILMASI” adlı tez çalışması 12/06/2023 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Batman Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Başkan

Doç. Dr. Selman AYDIN

.....

Danışman

Prof Dr. Hüseyin AYDIN

.....

Üye

Dr. Öğr. Üyesi Mahmut UYAR

.....

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Osman PAKMA
Enstitü Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

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

DECLARATION PAGE

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

İmza

Ali İhsan ÜLGEN

Tarih:

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

DİETİLETER VE ASPİR YAĞI BİYODİZELİ KARIŞIMININ BİR LPG RCCI MOTORUNUN ORTA YÜKLERİNDEKİ YANMA PERFORMANS VE EMİSYON DAVRANIŞININ DENEYSEL OLARAK ARAŞTIRILMASI

Ali İhsan ÜLGEN

BATMAN ÜNİVERSİTESİ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
OTOMOTİV MÜHENDİSLİĞİ BÖLÜMÜ

Danışman: Prof. Dr. Hüseyin AYDIN

2023, 51 sayfa

Jüri

Prof. Dr. Hüseyin AYDIN

Doç. Dr. Selman AYDIN

Dr.Öğr. Üyesi Mahmut UYAR

Son dönemlerdeki taşıt sayısındaki anlamlı artış nedeniyle, benzin ve motorine olan talep ve bunun tedariki dengesiz bir hal almıştır. Bu durumun devam etmesi halinde, benzin ve motorin daha maliyeti artacak ve yakıtlara ulaşım yetersiz olacaktır. Günümüzde artan enerji taleplerinin dengelenmesine olan ihtiyaç devam etmektedir. Fosil yakıtların kullanımının artması ve tükenmesiyle birlikte alternatif yakıtlar daha fazla önem kazanmaktadır. Bu yönüyle bitkisel yağın işlenmiş hali (biyodizel) dizel motorlar için potansiyel bir alternatif oluşturmaktadır. Deneylerde aspiden üretilen yağdan biyodizel yakıt olarak kullanılmıştır. Yapılan deneylerde kullanılan dizel yakıtı, biyodizel ve dietileterden oluşmuş olan yüksek reaktiviteli yakıt kullanılmıştır. Düşük reaktiviteli yakıt olarak ise LPG sabit %50 oranında emme manifolduna gönderilmiştir. Her deney yakıtı ayrıca 2 farklı motor çalışma koşulunda yapılmıştır. Bunlar birincisi, motor yüklü durumdayken: 7,2 kW orta yük ve ikincisi ise RCCI modu %50 LPG nin emme manifolduna püskürtülmesidir. Emisyon, yanma performansı ve motor performans deneyleri yapılmıştır. Bu çalışmanın en önemli olumlu sonuçlarından biri olarak, RCCI stratejisi BTE değerlerini artırabilir. Tüm test yakıtları için artan sıkıştırma oranı ile BTE değerlerinin arttığı görülmektedir. Test yakıtları için farklı RCCI modları karşılaştırıldığında, BTE değerlerinin oldukça yüksek olduğu ve yüksek DEE'li çalışma koşullarında dizel yakıtı geçtiği görülmektedir. Bu nedenle, tüm B90/DEE10 ve B85/DEE15 RCCI çalışma koşulları için en yüksek termal verim değerleri elde edilmiştir. Biyodizel/DEE RCCI modları için KEİ değerlerinin arttığı açıkça görülmektedir. Bu olumlu durumlar hiç şüphesiz RCCI çalışma modları sayesinde olmaktadır. Özellikle RCCI uygulamasında alev hızının artması, tama yakın yanma ve ısı transferinin azalması gibi sebepler verimi arttırmıştır. Ayrıca RCCI yanmasında silindir duvarı ve piston kafası yüzeylerinin yakınında bulunan yüksek sıcaklık bölgelerinin ortadan kaldırılması da önemli bir faktördür. Bu, ısı transfer kayıplarını azaltır ve genleşme işi artar. İkinci bir neden, RCCI uygulamasının yanmanın başlangıcını ve sonunu kontrol etmeyi kolaylaştırmasıdır. Sonuç olarak DİE ve LPG RCCI modunda motorun verim ve genel performansı ile yanma parametreleri artmıştır.

Anahtar Kelimeler: Aspir, biyodizel, dietileter, RCCI

ABSTRACT

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE COMBUSTION PERFORMANCE AND EMISSIONS BEHAVIOR OF A LPG RCCI ENGINE FUELED WITH A MIXTURE OF DIETHYL ETHER AND SAFFLOWER OIL BIODIESEL

Ali İhsan ÜLGEN

**GRADUATE EDUCATION INSTITUTE
AUTOMOTIVE ENGINEERING DEPARTMENT**

Advisor: Prof. Dr. Hüseyin AYDIN

2023, 51 Pages

Jury

**Prof. Dr. Hüseyin AYDIN
Asst. Prof. Dr. Selman AYDIN
Asst. Prof. Mahmut UYAR**

Due to the significant increase in the number of vehicles in recent years, the demand for and supply of gasoline and diesel fuel has become unbalanced. If this situation continues, the cost of gasoline and diesel will increase and access to fuels will be insufficient. Today, the need for balancing the increasing energy demands continues. With the increase and depletion of fossil fuels, alternative fuels gain more importance. In this respect, the processed form of vegetable oil (biodiesel) constitutes a potential alternative for diesel engines. In our experiments, biodiesel produced from safflower will be preferred. A highly reactive fuel consisting of diesel fuel, biodiesel and diethylether to be used in the experiments planned to be carried out was used. As a low reactivity fuel, LPG was sent to the inlet manifold at a fixed 50% rate. Each test fuel was also conducted under 2 different engine operating conditions (1. Engine loaded: 7.2 kW medium load 2. RCCI mode 50%). Emission, combustion degree and performance measurements were made. As one of the most important positive results of this study, the RCCI strategy can increase BTE values. It is seen that BTE values increase with increasing compression ratio for all test fuels. Comparing the different RCCI modes for test fuels, it is seen that the BTE values are quite high and surpass diesel fuel in high DEE operating conditions. Therefore, the highest thermal efficiency values were obtained for B90/DEE10 and B85/DEE15 RCCI operating conditions for all CR values. It is clearly seen that the BSEC values increase for the Biodiesel/DEE RCCI modes.

These positive situations are undoubtedly due to the RCCI operating modes. Especially in RCCI application, reasons such as increase in flame speed, near-complete combustion and decrease in heat transfer have increased efficiency. The elimination of high temperature zones near the cylinder wall and piston head surfaces is also an important factor in RCCI combustion. This reduces heat transfer losses and increases the expansion work. A second reason is that the implementation of RCCI makes it easy to control the start and end of combustion. Combustion timing and duration are optimized with combustion control. Compression work is reduced and expansion work is increased, which has increased the efficiency and overall performance of the engine.

Keywords: Biodiesel, diethylether, RCCI, safflower

İÇİNDEKİLER

TEZ KABUL VE ONAYI	II
TEZ BİLDİRİMİ	III
ÖZET	IV
ABSTRACT	V
İÇİNDEKİLER	VI
ŞEKİLLER LİSTESİ	VIII
TABLolar LİSTESİ	IX
1. GİRİŞ	1
1.1 Enerji Kavramı ve Enerji Kaynakları	2
1.2. Enerji Kaynakları	3
1.2.1. Petrol	3
1.2.2. Doğalgaz	5
1.2.3. Kömür	7
1.2.4. Sıvılaştırılmış Doğalgaz (LNG)	8
1.2.5. Nükleer Enerji	9
1.3. Alternatif Yakıtlar	10
1.3.1. Biyodizel	14
1.3.2. Etanol	15
1.3.3. Dietil Eter	16
1.4. İçten Yanmalı Motor Çeşitleri	17
1.3.1. Dizel Motorlarda Yanma	18
1.4.2.Dizel Yakıtların Özellikleri	20
1.4.3. Dizel Motorlarda Emisyon	20
1.4.3.1. CO _x Oluşumu	22
1.4.3.2. HC Oluşumu	22
1.4.3.3.NO _x Oluşumu	23
1.4.3.4. SO _x Oluşumu	23
1.5.RCCI Yanma Mekanizması	24
1.6.İlgili Araştırmalar	25

2. MATERYAL – YÖNTEM	27
2.1.Hesaplanan Parametreler	29
3. DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA	33
3.1.Silindir Basıncı	33
3.2.Isı Yayılma Hızı	34
3.3.Ortalama Gaz Sıcaklığı	35
3.4.Emisyon Parametreleri	37
3.4.1.Karbonmonoksit	37
3.4.2.Hidrokarbon	39
3.4.3.Azotoksit	40
3.4.4.Karbondioksit	41
3.4.5.Oksijen	42
1.10.Performans Parametreleri	42
4. SONUÇ ve ÖNERİLER.....	45
5. KAYNAKÇA	47
ÖZGEÇMİŞ.....	52

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1. Dünya Doğalgaz Rezerv Dağılımı (Trilyon m ³)	6
Şekil 1.2. Türkiye Doğalgaz Tüketim Miktarı (milyar m ³)	7
Şekil 1.3. Dünya Kömür Rezervlerinin Oransal Dağılımı	8
Şekil 1.4. Transesterifikasyon Reaksiyonu	14
Şekil 1.5. Etanol Üretimi	15
Şekil 1.6. Dietil Eter Üretimi	16
Şekil 1.8. Dizel Motorlarda Yanma	19
Şekil 1.9. Dizel Motorların Kirletici Etkileri	21
Şekil 1.10. Hava Fazlalık Katsayısı ve HC Emisyonu İlişkisi	22
Şekil 1.11. NO _x Emisyonu Kontrol Yöntemleri ve Etkileri	23
Şekil 1.12. RCCI Yanma Mekanizması	24
Şekil 2.1. Çalışmada kullanılan deney düzeneğinin şematik diyagramı	29
Şekil 3.1. Silindir basıncı değerlerinin krank açısına bağlı farklı çalışma koşulları için değişimi.....	33
Şekil 3.2. Çevrimsel özgül silindir basıncı değerlerinin krank açısına bağlı farklı çalışma koşulları için değişimi.....	34
Şekil 3.3. Isı salınım hızı değerlerinin krank açısına bağlı farklı çalışma koşulları için değişimi.....	35
Şekil 3.4. Çevrimsel özgül ısı salınım hızı değerlerinin krank açısına bağlı farklı çalışma koşulları için değişimi.....	35
Şekil 3.5. Ortalama gaz sıcaklığı değerlerinin krank açısına bağlı farklı çalışma koşulları için değişimi.....	36
Şekil 3.6. Çevrimsel özgül gaz sıcaklığı değerlerinin krank açısına bağlı farklı çalışma koşulları için değişimi.....	37
Şekil 3.7.a. Egzoz emisyonu değerlerinin farklı çalışma koşulları için yüzde olarak değişimi.....	38
Şekil 3.7.b. Egzoz emisyonu değerlerinin farklı çalışma koşulları için PPM olarak değişimi	38
Şekil 3.8. Motor performans parametrelerinin farklı çalışma koşulları için değişimi.....	44

TABLÖLAR LİSTESİ

Tablo 1.1. Dünya Petrol Rezervleri 2012-2016 (Milyon Varil).....	4
Tablo 1.2. Dünya Ham Petrol Üretim Miktarı 2012-2016 (Bin varil / gün)	4
Tablo 1.3. Alternatif yakıtlardan bazılarının sahip olduğu özelliklerin karşılaştırılması....	12
Tablo 1.4. Alternatif Yakıtlardan Bazılarının fiziksel ve kimyasal özellikleri.....	13
Çizelge 2.1 Dizel Motorun Özellikleri	28
Çizelge 2.2. Emisyon Cihazının Teknik Özellikleri.....	29
Tablo 3.1.Egzoz Emisyon Değerlerinin Farklı Çalışma Koşulları İçin Değişimi.....	39
Tablo 3.2.Motor Performans Parametrelerinin Çalışma Koşulları İçin Değişimi.....	44



1. GİRİŞ

Enerji, canlılığın devamı için en önemli kaynaklardan biridir. Ulaşım sektörü tamamen petrol yakıtlarına dayalıdır. Petrol ürünleri ve ham petrolün yetmeyeceği ve pahalılaşacağı göz önünde bulundurulursa, bu durum, ülke ekonomimiz için büyük bir sorun haline gelmiştir. Konvansiyonel yakıtların fiyatlarının her geçen gün artması ve kaynaklarının azalması, başta bitkisel yağlar olmak üzere alternatif yakıtların kullanımı konusunda yoğun çalışmaların yapılmasına neden olmuştur. Motorların yakıt ekonomisini iyileştirmek için çeşitli araştırma ve çalışmalar yapılmaktadır. Taşıt sayısındaki muazzam artış nedeniyle, benzin ve motorine olan talep ve bunun tedariki dengesizdir ve enerji taleplerini dengelemeye ihtiyaç vardır. Bu durum devam ederse senaryo daha da vahim olacaktır; benzin ve motorin daha maliyetli ve yetersiz olacaktır. Fosil yakıtların kullanımının artması ve tükenmesiyle birlikte, bugün tartışıldığı gibi alternatif yakıtlara daha fazla önem kazanmaktadır. Bu yönüyle bitkisel yağın işlenmiş hali (biyodizel) dizel motorlar için potansiyel bir alternatif oluşturmaktadır (Thangaraja & Srinivasan, 2019; Vijayakumar et al., 2016).

Biyoyakıtların, özellikle biyodizel ve etanol yakıtlarının, sıkıştırma ateşlemeli motorlarda geleneksel dizel yakıtın yerini alacak bir yakıt olarak sıklıkla öngörülmüştür. Ayrıca, çok az veya hiç motor modifikasyonu yapılmadan konvansiyonel petrol bazlı dizel yakıtların yerini alması beklenen oksijenli bir yakıttır. Biyodizel, çevresel olarak kabul edilebilir, ekonomik olarak uygulanabilir, toksik olmayan, biyolojik olarak parçalanabilir, teknik olarak uygun ve kolayca erişilebilir olduğundan ve ayrıca motordan egzoz emisyonlarını azaltması ile son yıllarda çok ilgi görmüştür. Genel olarak biyodizel, bitki tohumlarının yağlarından ve hayvansal yağlardan oluşabilen çevre dostu ve geri dönüştürülebilir bir yakıttır. Ayrıca dizel yakıtında bulunmayan oksijen moleküllerinden oluşan oksijenli yakıt olarak da adlandırılır. Biyodizel, dizel ve alkollerle karışabildiği için alkol ve dizeli karıştırmak için bir emülgatör olarak kullanılır. Bu nedenle biyodizel-alkol-dizel kombinasyonu yakıt karışımları olarak adlandırılır ve dizel motorlarda kullanılabilir (Tamilvanan et al., 2021; Verma et al., 2021). Çeşitli avantajlarına rağmen, biyodizel uygulamasının düşük ısı değeri, zayıf soğuk akış özellikleri ve yanma özellikleri gibi bazı eksiklikleri vardır. Pek çok araştırmacı, biyodizelin özelliklerini geliştirme olasılıklarına odaklanmıştır. Bununla ilgili çalışmalar arasında yakıt modifikasyonu güçlü tekniklerden biridir. Yakıt modifikasyonu, nano ölçekli metalik,

karbon ve organik katkı maddelerinin eklenmesiyle gerçekleştirilebilir. Biyodizeldeki nano parçacık katkı maddeleri, oksijen içeriğini iyileştirerek yakıt yükünün tamamen yanmasını, ısı ve kütle transfer hızlarını artırmayı, yüksek katalitik aktiviteyi ve tutuşma gecikme süresini ve zararlı emisyonları azaltmayı sağlar (Soudagar et al., 2020).

1.1.Enerji Kavramı ve Enerji Kaynakları

Enerji kavramı TDK tarafından ışık şeklinde ortaya çıkan güç, maddede mevcut olan ısı şeklinde tanımlanmıştır. Fakat bilim adamları enerjinin çalışma yeteneği olduğunu ifade etmiştir. Enerji kavramı iktisat bilimi tarafından ise iş yapabilme yeteneği olarak tanımlanmıştır. Sanayi devriminden ile birlikte elektriğin keşfedilmesi ve yaygın bir biçimde kullanılmaya başlanması ile birlikte insanların enerjiye duyduğu ihtiyaç artmıştır (CSO, 2019).

Tarihsel süreç göz önünde bulundurulduğunda elektriğin kullanılması ve keşfine ilişkin olarak birçok bilim adamının katkı sunduğu bilinmektedir. Ancak elektrik enerjisinin korunumu ve elektrik yüklerindeki zıt uçları ilk kez Benjamin Franklin tarafından ortaya atılmıştır. 1800'lü yıllarda gündelik yaşamda elektrik bir üretim unsuru şeklinde sanayi alanında kullanılmaya başlanmıştır. A. Edison tarafından New York'ta kurulan elektrik şebekesi ile birlikte elektrik enerjisinin kullanımı yaygınlaşmıştır(Chapman, 2007; Moran, 2010).

Petrol dünyada en yaygın biçimde kullanılan enerji çeşitlerinden biri niteliğindedir. Ayrıca petrolün stratejik olarak da oldukça önemli olduğu belirtilmektedir(Hu et al., 2013; Martin, 2010).Çünkü petrol, dünya genelinde kullanılmakta olan birçok malın hammaddesi niteliğindedir(Hassan et al., 2019).Petrol ile birlikte kömür de çevreye verdiği zararlara rağmen oldukça önem arz eden bir üretim unsurudur. Bu kapsamda doğal gaz da çevresel etkileri ve maliyeti sebebiyle son yıllarda üretim için sıklıkla kullanılmaktadır. Ancak doğal gaz da tıpkı diğer fosil yakıtlar gibi tükenebilmektedir(Díaz-Pérez & Serrano-Ruiz, 2020; Mackey & Lindenmayer, 2014). Savaşlar ve ülkeler arasındaki krizler göz önünde bulundurulduğunda birçoğunun altında yatan sebebin enerji kaynaklarına sahip olmak ve kontrol etmek olduğu bilinmektedir.

2017 yılında ABD Enerji Bilgi Yönetimi tarafından yayımlanan Uluslararası Enerji Görünümü (IEO) raporuna göre 2015-2040 yılları arasında dünyada enerji tüketiminin %28 oranında artacağı ifade edilmiştir. Söz konusu artışın kayda değer bir kısmına Ekonomik İşbirliği ve Kalkınma Teşkilatı (OECD)'na üye olmayan ülkelerin

neden olacağı ifade edilmiştir. Bu kapsamda OECD üyesi olmayan ülkelerin enerji tüketiminin %60 oranında artacağı öngörülmektedir(Huang et al., 2019).

2040 yılına kadar nükleer enerji, doğal gaz ve petrole olan talebin artacağı düşünülmektedir. Ancak kömüre olan talebin değişmeyeceği düşünülmektedir. Yine yenilenebilir enerjiye olan talebin de her yıl %2 ve üzerinde büyüyeceği öngörülmektedir. Nükleer enerjiye ilişkin talebin de her yıl %1,5 oranında artacağı düşünülmektedir. Yenilenebilir ve nükleer enerji kaynaklarına ilişkin talep fosil yakıtlardan daha fazla artacak olsa da 2040 yılına dek fosil yakıtların enerji ihtiyacının %25'inden daha fazlasını karşılayacağı ifade edilmektedir. Fosil yakıtlar göz önünde bulundurulduğunda doğal gazın oldukça düşük oranda karbon salınımına yol açtığı bilinmektedir(Huang et al., 2019).

1.2. Enerji Kaynakları

1.2.1. Petrol

Milyonlarca yıl öncesinde yaşamış olan bitki ve hayvanlardan meydana gelen hidrokarbon karışımı enerji kaynağı petrol olarak adlandırılmaktadır. Ham petrol fosil bir yakıttır ve toprağın altında sıvı şeklinde bulunmaktadır. Toprağın altından çıkarılan ham petrol rafineriye gönderilmekte ve burada kullanılabilir nitelikte petrol ürünlerine ayrıştırılmaktadır. Bu kapsamda rafineride şu ürünlerin elde edildiği ifade edilmektedir:

- Dizel
- Benzin
- Jet yakıtı
- Isınma yağı
- Petrokimya hammaddeleri
- Mumlar
- Asfalt

Bu kapsamda örneğin 42L ham petrol rafineride işlendikten sonra yaklaşık olarak 160L petrol ürünü elde edilebilmektedir. Bu durum patlamış mısır da benzetilmektedir(Narayan Thorat & Kumar Sonwani, 2022; Reitz & Duraisamy, 2015).

Dünyada ilk petrol kuyusunun Amerika'nın Rouseville adlı şehirde 1859 yılında Edwin Drake tarafından keşfedildiği ifade edilmektedir. Altın aramasından sonra bu konudaki ilgi petrol kuyularına doğru artmış ve oldukça kısa bir zaman içinde yaklaşık olarak 2.000 petrol kuyusu açılmıştır(Kokjohn et al., 2011).Türkiye'deki ilk petrol arama

çalışmalarının ise 1882 yılında gerçekleştirildiği belirtilmektedir. Daha sonraki süreçte ise 1926 yılında çıkarılan kanun uyarınca petrol aramaya ilişkin faaliyetlerin devlet tarafından yürütüleceği hususu düzenlenmiştir. 1923 ve 1954 yılları arasında petrol aramaya ilişkin faaliyetler yalnızca yerli kuruluşlar tarafından gerçekleştirilmiştir. Türkiye'deki ilk petrol kuyusu ise 1940 yılında Batman ilinde bulunmuştur. Yine Siirt'in Kurtalan ilçesinde de 1951 yılında petrol bulunmuştur (CSO, 2019).

Tablo 1.1.'de dünya petrol rezervleri gösterilmiştir. Bu kapsamda dünya petrol rezervinin yarısından fazlasının Orta Doğu'da yer aldığı görülmektedir. Bununla birlikte en az petrol rezervine sahip bölgenin ise Batı Avrupa olduğu görülmektedir.

Tablo 1.1. Dünya petrol rezervleri 2012-2016 (Milyon Varil) (Opat et al., 2007)

Bölge	2012	2013	2014	2015	2016
Kuzey Amerika (Kanada, Amerika Birleşik Devletleri)	34661	37652	40503	36218	36218
Latin Amerika (Arjantin, Brezilya, Şili, Kolombiya, Ekvator, Meksika, Peru, Trinidad & Tobago, Venezuela ve diğerleri)	338356	341522	341296	342549	339645
Doğu Avrupa ve Avrasya (Azerbaycan, Kazakistan, Romanya, Rusya, Türkmenistan, Ukrayna ve diğerleri)	119881	119874	119863	119860	119856
Batı Avrupa (Danimarka, Fransa, Almanya, İtalya, Hollanda, Norveç, Türkiye, Birleşik Krallık ve diğerleri)	10800	11337	10761	10064	11353
Orta Doğu (Bahreyn, İran, Irak, Kuveyt, Umman, Katar, Suudi Arabistan, Birleşik Arap Emirlikleri, Suriye, Yemen)	799132	802958	802512	802848	807730
Afrika (Cezayir, Angola, Kongo, Mısır, Ekvator Ginesi, Gabon, İbya, Nijerya, Sudan ve diğerleri)	128291	128070	127254	127969	128359
Asya ve Pasifik	47552	47860	48192	48385	49003
Toplam	1478673	1489272	1490386	1487893	1492164

Tablo 1.2. Dünya ham petrol üretim miktarı 2012-2016 (Bin varil / gün) (Opat et al., 2007)

Bölge	2012	2013	2014	2015	2016
Kuzey Amerika	77953	88493	101636	106786	100605
Latin Amerika	97013	96983	97407	97145	92223
Doğu Avrupa ve Avrasya	125074	126596	126499	126546	127655
Batı Avrupa	28882	27242	27503	28929	29199
Orta Doğu	241065	238453	235109	244943	266084
Afrika	82165	76389	71595	70948	66601
Asya ve Pasifik	74843	74462	74609	75936	72401
Toplam	726995	728618	734537	751233	754767

Türkiye'nin 2016 yılındaki günlük petrol üretiminin 49.500 varil olduğu ifade edilmektedir. Dünya genelinde 2016 yılında günlük petrol üretimi yaklaşık olarak 75 milyon varildir. Bu kapsamda Türkiye'nin günlük ham petrol üretimi içindeki payının yaklaşık olarak %0,3 olduğu görülmektedir(FIRAT et al., 2022).

1.2.2. Doğalgaz

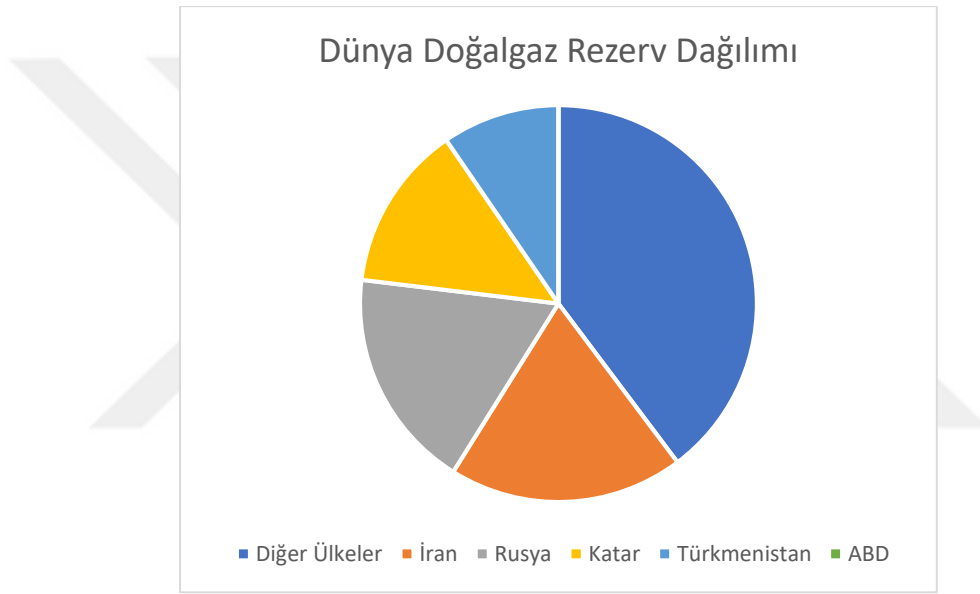
Birincil enerji kaynakları göz önünde bulundurulduğunda en çok tüketilen enerji kaynaklarından birinin de doğalgaz olduğu bilinmektedir. Milyonlarca yıl önce yaşamış olan hayvan ve bitkiler çürüyerek alüvyon ya da kum ile karışmaktadır. Bu karışım da tabakaların oluşmasına neden olmaktadır. Doğalgaz ise bu tabakalardan elde edilmektedir (Allen, 2014; Elkafas et al., 2021). Zaman geçtikçe kaya altına gömülmekte olan bitki ve hayvan fosilleri ısı ve basınç ile birlikte kömür, petrol ve doğalgaz haline gelmiştir. Doğalgaz herhangi bir renge, kokuya ya da tada sahip değildir. Bu nedenle de bu enerji kaynağının tespit edilmesi oldukça güçtür. Bu nedenle doğal gaz tedarikçileri gaz sızıntılarının anlaşılabilmesi için doğalgazın içine kükürtlü bir kimyasal ilave etmektedir. Karaların altında ve okyanusların tabanlarında doğalgaz bulunabilmektedir. Jeologlar tarafından belirlenen kayaç çeşitlerinde sondaj yapılarak doğalgaz keşfedilmekte ve elde edilmektedir. Kuyudan çıkarılmış olan doğal gaz ıslak gaz olarak da adlandırılmaktadır. Gazın içinde bulunan metan ve diğer faydalı gazlar doğalgazın içinde ayrıştırılmakta ve boru hatları aracılığıyla depolama tesislerine veya dağıtım şirketlerine aktarılmaktadır(Reitz & Duraisamy, 2015).

2016 yılında dünya genelindeki doğalgaz rezervinin 186,6 trilyon m³ olduğu belirtilmektedir. Bu kapsamda toplam doğalgaz rezervinin %42,5'i Orta Doğu'daki

ülkelerde bulunmaktadır. Bununla birlikte toplam doğalgaz rezervinin %27,7'si ise Avrasya ülkelerinde yer almaktadır. Avrupa kıtasında ise toplam doğalgaz rezervlerinin %2'si bulunmaktadır. En çok doğalgaz rezervine sahip olan üç ülke ise şu şekilde sıralanabilir(Li et al., 2017):

- Katar
- Rusya Federasyonu
- İran

Şekil 1.1'de dünyada en çok doğalgaz rezervine sahip olan beş ülke gösterilmiştir.



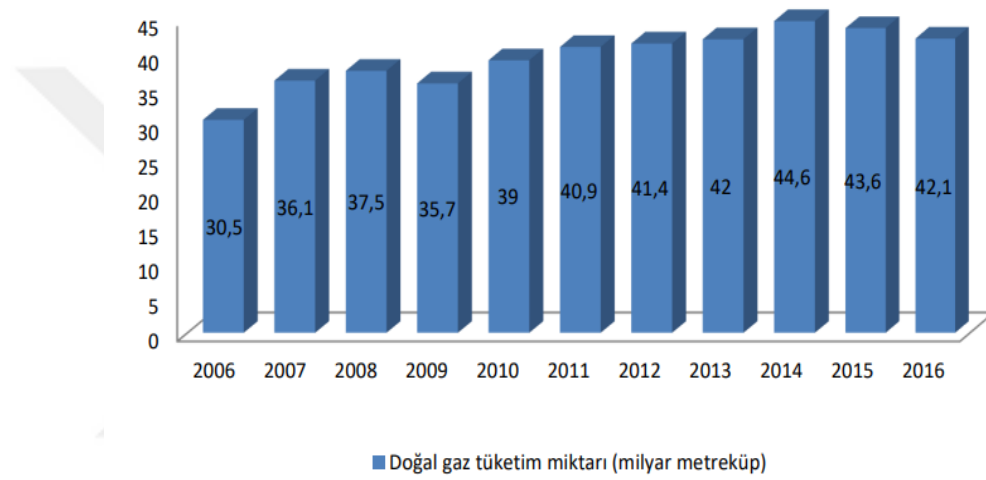
Şekil 1.1. Dünya doğalgaz rezerv dağılımı (Trilyon m³) (Li et al., 2017).

Türkiye’de doğalgaz üretimi ilk olarak 1977 yılında başlamıştır. Söz konusu üretim 1977 yılında Kırklareli’nin Lüleburgaz ilçesinde ve 1982 yılında da Mardin’in Çamurlu ilçesinde başlamıştır. Türkiye’deki doğalgaz rezervinin oldukça az olduğu bilinmektedir. Bu nedenle Türkiye’de kullanılan gazın yaklaşık %99’u için ithalat yapılmaktadır. Türkiye’de 1988 yılında Ambarlı Termik Santrali açılmıştır. Bu durum da ilk doğalgaz ithalatının yapılmasını sağlamıştır. Bu kapsamda ilk doğalgaz ithalatı Sovyet Sosyalist Cumhuriyetler Birliği’nden 1986 yılında ki 25 yıllık anlaşma ile yapılmıştır. 1987 yılında ise fiili olarak ilk ithalat gerçekleşmiştir(CSO, 2019). Türkiye’nin doğalgaza olan bağımlılığı petrolden daha yüksek orandadır. Çünkü Türkiye’de tüketilen doğalgazın yaklaşık olarak yarısı elektrik üretimi için kullanılmaktadır. 2016 yılında doğalgaz ithalatı yapılan ülkeler ve oranları şu şekilde sıralanabilir(Li et al., 2017).

- Rusya (%53)
- İran (%17)
- Azerbaycan (%14)
- Cezayir (%9)

Doğalgaz ithalatının %70'inin Rusya ve İran'dan yapılıyor olmasının oldukça riskli olduğu belirtilmektedir.

Şekil 1.2'de Türkiye'deki doğalgaz tüketim miktarı yıllara göre gösterilmiştir. Söz konusu şekil incelendiğinde 2006 yılından sonra Türkiye tarafından tüketilen doğalgazın arttığı ancak 2014 ve 2016 yılları arasında azaldığı görülmektedir.



Şekil 1.2. Türkiye doğalgaz tüketim miktarı (milyar m³) Chapman et al., 2007; FIRAT et al., 2022)

1.2.3.Kömür

Dünya genelinde kullanılmakta olan enerjinin %28'i kömürden elde edilmektedir. Bu kapsamda petrolden sonra en çok kullanılan enerji çeşidinin kömür olduğu ifade edilmektedir. Türkiye'de de kömürün toplam enerji tüketimi içindeki oranı %28'dir. Bataklık olarak nitelendirilen bölgelerde milyonlarca yıl boyunca bitkiler bozulmuş, parçalanmış ve bataklık suyu ile birlikte kimyasal reaksiyonlara girmiştir. Bu durum da söz konusu organik kalıntıların kimyasal ve fiziksel olarak değişikliklere uğramasına yol açmıştır. Uygun koşullar altında fosiller basınç ve ısı etkisi altında öncelikle turba adlı kömür olarak nitelendirilmeyen bir maddeye dönüşmektedir (Tesfa et al., 2013; Wu & Shang, 2022).

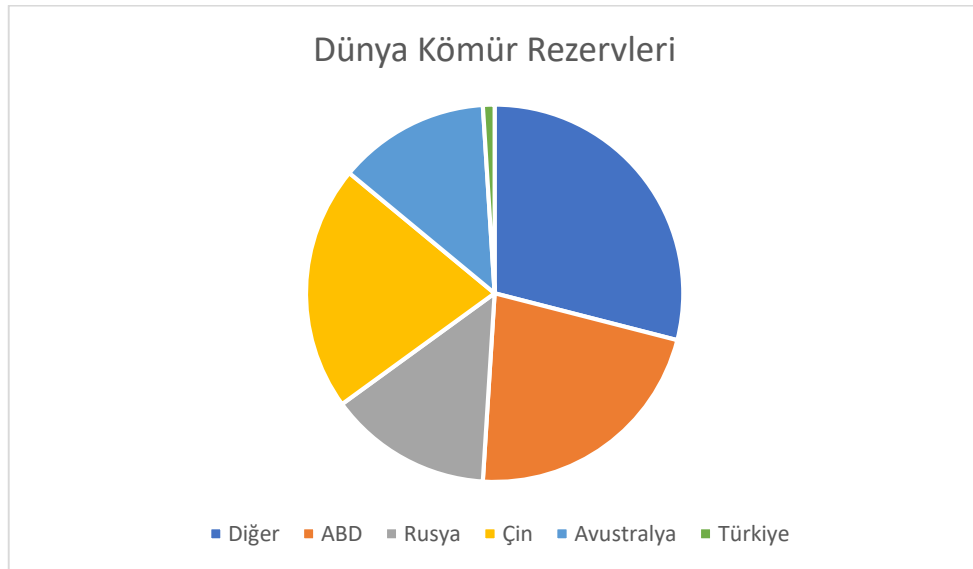
Kömürün sınıflandırılması noktasında kömürün üretebileceği ısı derecesi ve içeriğindeki karbon oranı önem arz etmektedir. Bu kapsamda dört farklı kömür türü olduğu ifade edilmektedir. Bunlar şu şekilde sıralanabilir:

- Grafit
- Antrasit
- Taş kömürü
- Linyit

En kaliteli olan ve en yüksek ısı veren kömür türünün antrasit olduğu belirtilmektedir. Bu nedenle bu kömür türü metal sanayinde kullanılmaktadır. Antrasitten sonra en kaliteli olan ve yüksek ısı veren kömür türünün ise taş kömürü olduğu ifade edilmektedir. Bu kömür türü de çoğunlukla demir ve çelik endüstrisinde kullanılmaktadır. En düşük ısı değerine sahip olan kömür türünün ise linyit olduğu belirtilmektedir(Huang et al., 2019).

Türkiye’de kömür ilk olarak 1829 yılında keşfedilmiş ve 1848 yılında ise işletilmeye başlanmıştır. Cumhuriyet’in ilan edilmesi ile birlikte ülkenin kalkınması için en önemli kaynaklardan birinin kömür olduğu hususu göz önünde bulundurulmuştur(Mutluer, 1990).

Şekil 1.3.’de 2016 yılında dünyadaki kömür rezervlerinin ülkelere göre dağılımı yer almaktadır. Buna göre dünya genelindeki kömür rezervinin %22’si ABD’de yer almaktadır. Türkiye’de bulunan kömür rezervi ise dünya geneline %1 oranındadır. Günümüzde kömüre olan talep göz önünde bulundurulduğunda dünya genelinde kömür rezervlerinin 160 yıl ömrünün kaldığı öngörülmektedir(Lozano et al., 2021).



Şekil 1.3. Dünya kömür rezervlerinin oransal dağılımı (FIRAT et al., 2022)

1.2.4. Sıvılaştırılmış Doğalgaz (LNG)

LNG'nin doğalgaz ve ham petrolün bir türevi olduğu ifade edilmektedir. Michael Faraday tarafından yürütülen çalışmalar doğalgazın sıvılaştırılmasına ilişkin çalışmaların başlangıcı niteliğindedir. 1800'lü yılların sonlarında da soğutma kompresörünün keşfi gerçekleştirilmiştir. 1917 yılında ise Amerika'da ilk LNG sıvılaştırma tesisinin kurulumu gerçekleştirilmiştir.

LNG ticareti ve kullanımının 2008 krizi öncesinde ve sonrasında artış gösterdiği kaydedilmiştir. Bu kapsamda 2008 yılında LNG ticareti 226 milyar m³ olarak gerçekleşmiştir. Bununla birlikte 2015 yılında %50'li bir artış gerçekleşmiş ve LNG ticaret oranı 338 milyar m³'e çıkmıştır. Dünya genelindeki LNG ticareti göz önünde bulundurulduğunda en büyük ihracatçının %31'lik oran ile Katar olduğu ifade edilmektedir. Bununla birlikte en çok LNG ithalatı yapan ülkenin ise %34'lük oran ile Japonya olduğu belirtilmektedir(Balcombe et al., 2022; Zweglinski 2022).

1.2.5. Nükleer Enerji

Atomun çekirdeğinde bulunan enerji türü nükleer enerji olarak adlandırılmaktadır. Maddenin en küçük yapı birimi atom olarak adlandırılmaktadır. Bununla birlikte nötron, elektron ve proton atomu meydana getirmektedir. Elektronlar negatif ve protonlar da pozitif yüklüdür. Nötronlar ise elektrik yüküne sahip değildir. Atomun çekirdeğini bir arada tutma görevini üstlenen bağlarda oldukça yüksek enerji bulunmaktadır. Söz konusu bağlar kırılarak nükleer enerji ortaya çıkarılmaktadır. Bağlar ise nükleer füzyon çalışması ile birbirinden ayrılabilir. Nükleer füzyon çalışması esnasında uranyum ile nötron birbirleri ile çarpıştırılmakta ve bağların kırılması sağlanmaktadır. Bu şekilde büyük bir ısı ve ışınım ortaya çıkmaktadır. Bahsedilen işlem birçok kez tekrarlanarak nükleer reaksiyon gerçekleştirilmekte ve enerjiye dönüştürülmektedir. Söz konusu enerjinin elde edilebilmesi için U-235 olarak adlandırılan uranyumun bir türü kullanılmaktadır. Her ne kadar uranyum yaygın bir enerji kaynağı ise de U-235 oldukça nadir görülen bir uranyum türüdür(Grandin et al., 2010; Reitz & Duraisamy, 2015).

Nükleer enerjinin oldukça yaygın bir biçimde elektrik üretimi için kullanıldığı ifade edilmektedir. 1950'li yıllarda ilk kez nükleer enerji kullanılarak elektrik üretimi yapılmıştır. Elektrik üretimi için kullanılan nükleer tesislerin sayısı bu tarihten itibaren artış göstermiştir. Nükleer enerji kullanarak elektrik enerjisi üreten öncü ülkeler şu şekilde sıralanabilir:

- SSCB (1954)
- ABD (1957)
- FRANSA (1963)

Fakat 1986 yılında Çernobil’de ve 1979 yılında Three Mill Island’da meydana gelen nükleer kazalar nükleer enerjinin kullanılmasına ilişkin olarak endişelere yol açmıştır. Bu nedenle 1990 yılında sonra yeni nükleer tesislerin kurulması azalmıştır. Ancak her ne kadar nükleer enerjinin büyüme hızı yavaşlamış olsa da günümüzde oldukça önemli bir enerji kaynağı niteliğine sahip olduğu söylenebilmektedir. Bu kapsamda dünya genelinde üretilen elektriğin % 14’ünün ve OECD ülkelerinde üretilen elektriği de % 21’inin nükleer enerji kullanılarak üretildiği belirtilmektedir. Son yıllarda fosil yakıtların kullanılmasının çevre ve enerji arz güvenliği üzerindeki etkileri yeni nükleer tesisler kurulması ve mevcut nükleer tesislerin ise ömrünün uzatılmasına yol açtığı ifade edilmektedir. Fakat Fukushima’da 2011 yılında gerçekleşen nükleer kaza sonrasında ülkelerin büyük bir kısmı nükleer enerji projelerini hayata geçirmemeye karar vermiştir ancak yine de elektrik tüketiminin artması ve sera gazı salınımına ilişkin kısıtlamalar nükleer enerjiye olan ilginin azalmamasını sağlamaktadır(*Energy Explained - U.S. Energy Information Administration (EIA)*, n.d.).

Türkiye’nin enerjide dış ülkelere olan bağımlılığını azaltmak istediği ve bu nedenle de Akkuyu ve Sinop nükleer tesislerinin kurulması için gerekli hazırlıkları yaptığı bilinmektedir. Bununla birlikte İğneada’da da bir nükleer tesis kurulacağı belirtilmiştir.

1.3.Alternatif Yakıtlar

Teknoloji alanında meydana gelen gelişmeler ve nüfusun artması enerjiye olan ihtiyacın da artmasına neden olmuştur. Enerji ise çoğunlukla fosil yakıtlar kullanılarak karşılanmaktadır. Fakat fosil yakıtlar birçok sebepten dolayı insanların alternatif yakıtları tercih etmesini sağlamıştır. Bu sebepler şu şekilde sıralanabilir(*PDF) Türkiye Ekonomisinde Enerji Tüketimi ile Ekonomik Büyüme İlişkisi (1972-2011)*, n.d.):

Fosil yakıtların sınırlı bir enerji kaynağı olması

- Ekonomik açıdan oldukça maliyetli olması
- Ülkeler arasında problemlere yol açması
- Fosil yakıtların yanması neticesinde meydana gelen emisyonların birçok yol denenmesine rağmen engellenememesi

Alternatif yakıtlar kullanılarak daha az emisyon üretimi ve daha iyi bir yanma hedeflenmektedir. Alternatif yakıtların kullanılmasının sebepleri ise şu şekilde sıralanabilir:

- Daha az maliyet gerektirmesi
- Üretilmesinin kolay olması
- Kolaylıkla bulunulabilmesi
- Dışa bağılılığın azalması

Çoğunlukla kullanılan alternatif yakıtlar ise şu şekilde sıralanabilir:

- Etanol
- Metanol
- Biyodizel
- Doğalgaz
- Hidrojen

Kanola, mısır, pamuk ve ayçiçeği gibi yağlı tohum bitkileri kullanılarak elde edilen hayvansal ve bitkisel yağların katalizör kullanılarak kısa zincirli bir alkol olan etanol ya da metanol ile reaksiyona girmesi sağlanmakta ve söz konusu reaksiyon neticesinde alternatif bir yakıt olan biyodizel ortaya çıkmaktadır. Amerika’da soya yağı, Avrupa’da kanola yağı ve Türkiye’de de pamuk ve ayçiçek yağının biyodizelin hammaddesi olduğu belirtilmektedir. Fakat biyodizel üretimine bazı standartlar getirilmiştir. Bu kapsamda biyodizelin düşük sülfür ve yüksek oksijene sahip olması gerekmektedir(OPEC : *Annual Statistical Bulletin*, n.d.).

16 ve 20 karbon sayısına sahip olan hidrokarbonlar biyodizeli meydana getirmektedir. Karbon sayısının yüksek oluşu yanıcılık özelliğini de olumlu yönde etkilemektedir. Sahip olduğu bu niteliklerden dolayı dizel yakıtı ile biyodizelin birbirine karıştırılarak kullanılması mümkün olmaktadır. Bu şekilde HC, CO ve partikül madde emisyonlarında azalma görülmüştür. Bununla birlikte biyodizel azot emisyonlarında ve yakıt tüketiminde artışa yol açmaktadır. Biyodizel ve dizel yakıt karışımı tek başına dizel yakıttan daha yüksek bulutlanma ve akma noktasına sahip olmaktadır. Bu durum söz konusu yakıtların soğuk hava şartlarında kullanılmasını güçleştirmektedir. Bulutlanma, akma ve soğuk filtre noktasının düşürülebilmesi için antijel vb. katkı maddeleri biyodizele ilave edilebilmektedir(*Statistical Review of World Energy | Energy Economics | Home*, n.d.). Biyodizelin sahip olduğu avantajlar ise şu şekilde sıralanabilir:

- Motorda yağlamaya katkıda bulunması

- Doğada oldukça kısa bir zamanda bozunabilmesi
- Zehirleyici etki göstermemesi
- Temiz emisyonlara sahip olması
- Yenilebilir nitelikte olması

Biyodizel hem tek başına yakıt olarak hem de dizel yakıt ile karıştırılarak kullanılabilir. Ancak en iyi oranın %80 dizel yakıt ve %20 biyodizel karışımı olduğu belirtilmektedir. Ayrıca biyodizelin sahip olduğu şu özellikler termal ve güç veriminde azalmalar görülmesine yol açmıştır:

- Viskozite
- Yoğunluk
- Kalorifik değer

Bu nedenle biyodizel belirli oranlarda eklenmekte ve eklenirken de bazı katkı maddelerine gereksinim duyulmaktadır. Biyodizelin viskozitesi dizel yakıtı göre yüksektir. Bu nedenle enjeksiyon sürecinde problem ortaya çıkmaması için viskozitesi düşük olan alkoller karışıma eklenebilmektedir(*TÜRKİYE PETROLLERİ MAYIS 2018*, 2018).

Biyokütleden üretilmesi mümkün olan ve yüksek oksijen içeriğine sahip olan yenilenebilir alternatif yakıtlar alkol olarak adlandırılmaktadır. Alkollere örnek olarak ise şunlar gösterilebilir:

- Bütanol
- Metanol
- Etanol

Petrol esaslı hammaddeler kullanılarak metanol ve etanol üretilmemektedir. Metanol üretiminin etanole kıyasla daha kolay olduğu ve daha az maliyet gerektirdiği ifade edilmektedir. Ancak buna rağmen metanol araç üzerinde korozyona yol açmaktadır. Bu sebeple metanol kullanılması tercih edilmemektedir. Etanol ise yüksek alev hızına ve tutuşma eğilimine sahip olması ile yüksek vuruntu direncine sahip olması nedenleriyle daha yüksek avantaja sahiptir. Ayrıca etanoller tarım ürünler kullanılarak da üretilmektedir. Bununla birlikte etanoller yüksek oktan sayısına sahiptir. Bundan dolayı da benzinli motorlarda kullanılması tercih edilmektedir(*Türkiye Taşkömürü Kurumu*, n.d.).

Dietil eter (DEE) etanol üretiminde yan ürün olarak ortaya çıkmaktadır. Ayrıca alkol bazlı bir ürün olduğu ve bu nedenle de alternatif yakıt olarak kullanılabileceği ifade

edilmektedir. Dietil eterin oksijen içeriği, ısı değeri ve setan sayısı yüksektir. Bu nedenle alternatif yakıtlar arasında sıklıkla tercih edilmektedir. Alternatif yakıtlardan bazılarının özellikleri ise Tablo 1.3.'de gösterilmektedir.

Tablo 1.3. Alternatif yakıtlardan bazılarının sahip olduğu özelliklerin karşılaştırılması(Yorulmaz et al., 1998)

Yakıt	Hava kirliliği üzerindeki etki	Güvenlik ve çevresel etkiler
Doğalgaz	Toplamda önemli düzelme görülmekte birlikte NO _x 'de az etki görülmektedir.	Doğalgaz için yüksek sıkıştırma gereklidir. Ayrıca doğal kaynakların korunumunu sağlamaktadır.
LPG	Toplamda önemli düzelme görülmekte birlikte NO _x 'de az etki görülmektedir.	En düşük sıcaklıkta depolama imkânı mevcuttur. Ayrıca güvenlidir.
Hidrojen	Oldukça az miktarda NO _x vermektedir.	Sudan elde edilmesi durumunda doğal kaynak korunumu mevcuttur. Fakat soğutma ya da sıkıştırma gerekli olmaktadır.
Metanol	Orta miktarda azalma	Suda çözünümü zehirleyici etkiler gösterebilmektedir.
Etanol	Orta miktarda azalma	Doğal kaynak korunumu mevcuttur.
Bitkisel yağ	CO çıkışı fazladır.	Doğal kaynak korunumu mevcuttur.

Alternatif yakıtların birçok madde kullanılarak üretilmesi mümkün olabilmektedir. Bu durum farklı mevsim koşullarına sahip olan bölgelerde de aynı ürünün üretilebileceğini göstermektedir. Alternatif yakıtlardan bazılarının kimyasal ve fiziksel özellikleri Tablo 1.4.'de gösterilmektedir.

Tablo 1.4. Alternatif yakıtlardan bazılarının fiziksel ve kimyasal özellikleri(Kömür Sektor_raporu_tki, n.d.)

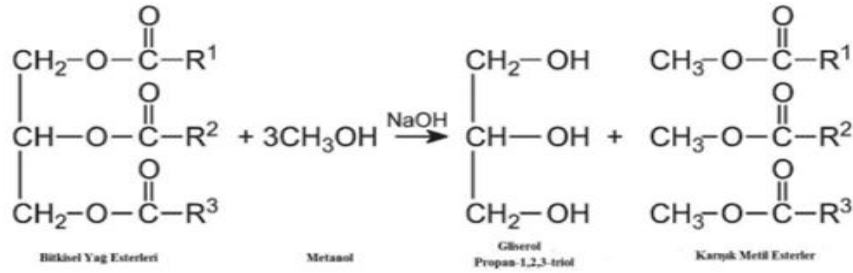
	Hidrojen	Metan	Metanol	Etanol	Benzin	Dizel
Kimyasal denklemi	H ₂	CH ₄	CH ₃ OH	C ₂ H ₅ OH	(C ₈ H ₁₈) ^a	-
C/H Oranı	0	0.25	0.25	0.333	0.556	0.520
Moleküler ağırlığı	2.02	16.04	32.04	46.07	91.4	170
Özgül Ağırlığı						
Sıvı (kg/dm ³)	0.07	0.424	0.790	0.790	0.73 ^a	0.83
Gaz (kg/dm ³)	0.84x10 ⁻⁴	0.78x10 ⁻³	1.43x10 ⁻³	1.96x10 ⁻³		
Isıl Değeri						
(Mj/kg)	119.93	50.8	20.1	26.9	43.4	43.1
(Mj/litre)	8.41	20.8	15.9	21.3	31.8	

Stokiyometrik karışım için;						
Hava/yakıt(kütlesel)						
Hava/yakıt (hacimsel)	34.32	17.2	6.44	8.96	14.7	14.5
Isıl değer (kJ/litre)	2.38	9.53	7.14	14.3	45.79	
	3.20	3.40	3.53	3.61	3.78	
Mol _{ürünler} /Mol _{reaktantlar}	0.85	1.00	1.06	1.06	1.04	
Buharlaşma ısısı (Mj/kg)	0.447	0.509	1.102	0.856	0.272 ^a	0.3
Tutuşma sınırları						
%hacim	4.1-74	5-15.4	6-37	3.5-19	1.3-7.6	
Δ	0.15-4.35	0.59-2.0	0.24-2.22	0.29-1.92	0.29-1.67	0.48-1.35
Laminar alev hızı (m/s)	2.91	0.37	0.52		0.37	
Adyabatik alev sıcaklığı	2110	1954	1878	1924	1993 ^a	
(°C)						
Difüzyon katsayısı (m²/s)	0.61	0.16			0.08	
Kaynama noktası (°C)	-252.35	-161.3	65.1	78.7	32-221	170-350
Donma noktası (°C)	-259		-97.6	-114.1	-56 ^a	
Kendi kendine tutuşma sıcaklığı (°C)	574-591	632	470	392	257	
Oktan sayısı						
ROS	130	130	110	106	91-100	
MOS		105	87	89	82-94	

1.3.1.Biyodizel

Biyodizel yakıtın temelini organik yağların farklı yöntemlerle birlikte katalizör kullanılması ve alkol ile tepkimeye sokulması oluşturmaktadır. Biyodizel yakıt tipi olarak metil esteri ve etil esteri tipinde bir yakıt olarak nitelendirilmekle birlikte orta uzunlukta C₁₆-C₁₈ zincirlerini kapsamaktadır(Karagöl & Kaya, 2016; Živković & Veljković, 2018). Biyodizel yakıtın formülü C₁₉H_{35,2}O₂ şeklindedir. Üretiminde ağırlıklı olarak bitkisel ve hayvansal yağlar kullanılmaktadır. Bununla birlikte üretime kızartma yağı gibi çeşitli evsel atık yağları da dahil edilebilmektedir. Günümüz teknolojik koşulları itibariyle algler dahi kullanılarak biyodizel yakıt üretimi sağlanabilmektedir. Günümüz koşullarında bu imkânlara sahip olunmasına karşın söz konusu yağların viskozite değerlerinin yüksekliğine bağlı olarak üretilen biyodizel yakıtların yakıt olarak kullanımı mümkün olmamaktadır. Biyodizel yakıtlar temel olarak transesterifikasyon, piroliz, seyreltme ve mikroemüsyon gibi çeşitli yöntemler kullanılarak üretilmektedir. Söz konusu yöntemler kullanılarak biyodizel yakıtın üretiminde kullanılan maddelerin viskozite değerleri düşürülmektedir. Böylece ortaya çıkan yakıtın kullanımı mümkün olmaktadır. Biyodizel yakıt üretiminde en yaygın kullanılan üretim yöntemi transesterifikasyon yöntemi

olmaktadır. Transesterifikasyon yöntemi ile üretim yapılması sonucunda temel ürünlerin yanı sıra gliserin de yan ürün olarak ortaya çıkmaktadır(Narwal & Gupta, 2013). Transesterifikasyon yöntemi Şekil 1.4'te gösterilmektedir.



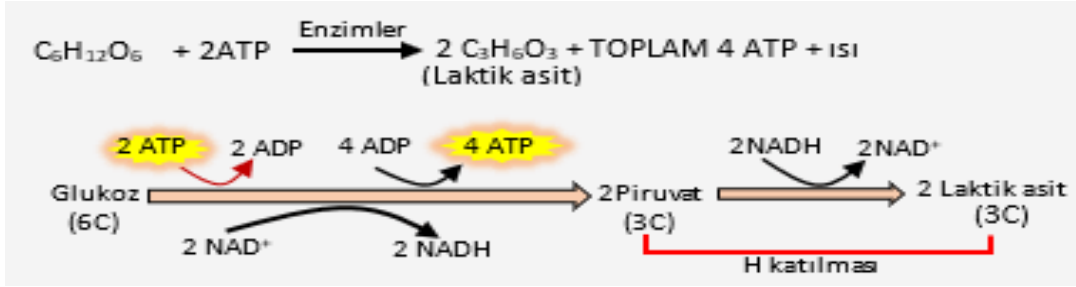
Şekil 1.4. Transesterifikasyon reaksiyonu

Organik yağlar kullanılarak üretilen biyodizel yakıtlar genel bağlamda viskozite değerlerinin dizel yakıtı göre daha fazla olması nedeniyle performans verimliliğinin artırılabilmesi için viskozite değeri düşük olan bir alkol karışımının reaksiyona dahil edilmesi gibi gerekliliklere söz konusu olabilmektedir. Biyodizel yakıt ve dizel yakıt karşılaştırıldığında biyodizel yakıtın enerji verimliliği daha düşük olmakla birlikte yoğunluğu daha yüksektir. Bu durum yakıtın daha çok kullanılması gibi bir duruma neden olması dolayısıyla genel anlamda dizel yakıtı kıyasla daha verimsiz bir yakıt türüdür. Ayrıca setan sayısı da kullanılan yağa bağlı olarak farklılık göstermektedir. Optimal düzeyde kullanılması halinde motorun yağlanması açısından olumlu etkiler sağlamakta ve aşınmayı azaltmaya yardımcı olmaktadır. Bu durum CO ve HC emisyonlarının azalmasında etkili olmasına karşın NO_x emisyonunda ise artışa neden olmaktadır. Biyodizel yakıtlarda sülfür bulunmamaktadır. Temel yapısı dolayısıyla dizel yakıtı kıyasla doğada daha kolay ve hızlı bir süreçte bozunabilmektedir. Ayrıca belirli bir düzeye kadar mikrobiyolojik açıdan olumsuz etkileri bulunmamaktadır. Bununla birlikte biyodizel yakıtlar insan sağlığı ve çevreyi olumsuz etkileyecek bir gaz üretmemektedir(Karagöl & Kaya, 2016).

1.3.2.Etanol

Etanol yakıtı şeker ve nişasta yani karbonhidratların fermantasyonu sonucu ortaya çıkan bir yakıttır. Bununla birlikte yenilenebilir özelliğe sahiptir. Etanolün kimyasal formülü C₂H₆O şeklindedir. Bununla birlikte farklı formül yapılarında da

kullanılabilmektedir(Hammerschlag, 2006). Etanol yakıt ayrıca dimetil eterin izomeri niteliğini taşımaktadır. Etanolün üretimi Şekil 1.5'te gösterilmektedir.



Şekil 1.5. Etanol üretimi

Etanol üretimi pek çok farklı tarımsal ürün kullanılarak gerçekleştirilebilmektedir. Bununla birlikte atık maddelerin kullanımı ile de üretilebilmektedir. Etanol alkol grubunda yer almaktadır. Etanolün temel özellikleri şunlardan oluşmaktadır:

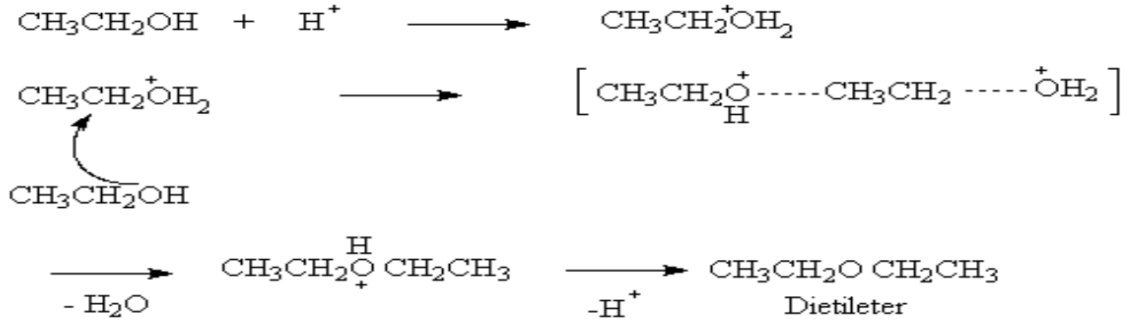
- Uçucu
- Renksiz
- Yanıcı
- Çözücü
- Sıvı
- Yüksek O_2
- Daha küçük molekül yapısı
- Dizel yakıt ile yüksek oranda karışabilme
- Tutuşma eğilimi yüksek
- Yüksek alev hızı
- Vuruntu direnci

Etanol yakıtı yüksek miktarda O_2 içermesi nedeniyle NO_x emisyonu artışına neden olmaktadır(Yao et al., 2009). Bu durum performans verimliliği açısından olumlu etkiye sahip olmasına karşın çevresel açıdan olumsuz bir etkiye neden olmaktadır. Etanolün dizel yakıtı optimal düzeyde eklenmesi sonucunda egzoz emisyonu açısından iyileştirici bir etki ortaya koymaktadır. Fakat bununla birlikte oktan sayısı yüksektir. Bu durum etanolün dizel yakıttan daha çok benzin yakıtlarında kullanılabılır yapmaktadır.

1.3.3.Dietil Eter

Dietil eter bir yan üründür. Bu bağlamda çoğunlukla etanol üretiminde etilenin hidrasyona uğramasına bağlı olarak ortaya çıkmaktadır(Karagöl & Kaya, 2016). Dietil eterin kimyasal formülü $C_4H_{10}O$ ($CH_3-CH_2-O-CH_2-CH_3$) şeklindedir. Yaygın olarak kullanılan ismi eterdir. Bununla birlikte bütanolün izomeri niteliğindedir. Şekil 1.6'da

dietil eterin üretimi gösterilmektedir. Şekil 1.6’da görüleceği üzere birkaç reaksiyonun gerçekleşmesi sonrasında üretilebilmektedir.



Şekil 1.6. Dietil eter üretimi

Dietil eterin temel özellikleri şunlardan oluşmaktadır[39];

- Renksiz
- Uçucu
- Berrak
- Kolay yanabilme
- Kolay parlayabilme
- Yüksek çözücülük
- Kendine özgü koku
- Dizel yakıtı göre ısı değeri ve setan sayısı yüksektir.
- Yüksek O₂
- Tutuşma sıcaklığı düşük
- Dizel yakıt ile yüksek oranda karışabilme
- Optimal düzeyde kullanılması durumunda fren termal veriminde artış
- Motorun egzoz emisyonunda ve performansında iyileştirici bir etkisi bulunmaktadır.

Dietileter yüksek miktarda O₂ içermesi sebebiyle performans açısından olumlu bir etki ortaya koymasına karşın NO_x emisyonu artışına neden olmaktadır.

1.4.İçten Yanmalı Motor Çeşitleri

Her bir yakıtın kendine özgü farklı kimyasal enerjisi bulunmaktadır. Bu enerjinin yanması ve oksidasyon prosesleri sonrasında ısı enerjisi ortaya çıkar. Buna bağlı olarak gaz basıncı ve sıcaklığı hızlı bir şekilde artış göstermektedir. Böylece mekanik iş sağlanabilmektedir. Söz konusu mekanik işi gerçekleştiren makineler “motor” olarak adlandırılmaktadır(Horvath & Rachlew, 2016). Motorlar çeşitlerine göre farklı şekillerde

Çalışma prensibine sahiptir. Bu bağlamda içten ve dıştan yanmalı iki farklı motor çeşidi bulunmaktadır.

Silindirin i bölgesinde yer alan pistonlar alt ve st noktalara gel-git hareketi yapmaktadır. Bu noktalar st l nokta (N) ve alt ölü nokta (AN) olarak adlandırılmaktadır ve sabittir(şimşek et al., n.d.).

İki motor çeşidinden biri olan içten yanmalı motorların çalışma prensibi pistonun silindirin i bölgesinde gerçekleştirmiş olduğu dört aşamalı hareketin gerçekleşmesi ile sağlanmaktadır. Pistonun alt noktadan st konuma doğru hareketi sürecinde egzoz ve emme subabları kapalı kalmaktadır. Bu hareket sürecinde yakıt ve hava karışarak sıkışmaktadır. Pistonun N olarak adlandırılan noktaya yaklaştığı sırada ateşleyici aracılığıyla sıkıştırılan yakıt ve hava karışımı yanmaktadır. Bunun sonucu olarak yüksek bir basınç elde edilmektedir. Bu basınç pistonun st noktadan alt noktaya yönlü olacak şekilde ilerlemesini ve krank milinin dönmeye başlamasını sağlamaktadır. Böylece strok boyunca hareket eden piston iş üretimi sağlamaktadır. Yanma ve gaz oluşumu genişleme strokunda gerçekleşmektedir. İçin oluşturulması sürecinde üretilen gazın dışarıya salınımı için pistonun AN'e yaklaştığı süreçte egzoz subabı açılmaktadır. Subap açıldığında gaz mevcut basıncı ile dışarı salınmaktadır(şİMşEK & olak, 2019).

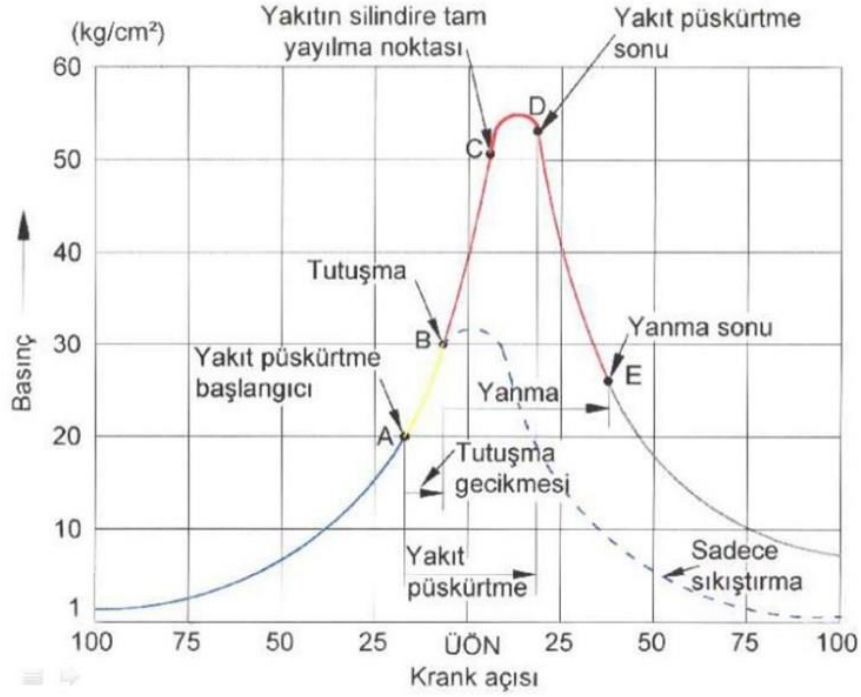
Motorun mekanik olarak iş getirme sürecinde piston en alt noktaya gelmesinin ardından tekrar aynı hareketi gerçekleştirmek üzere yukarı hareket eder. Bu hareket sırasından oluşan gaz egzoz subabına itilmektedir. Böylece egzoz stroku tamamlanmaktadır. Motorun çalıştığı süreçte pistonun en st noktaya hareketinden önce emme subabı açılmaktadır. Pistonun en st noktaya ulaşmasının ardından ise diğer subap olan egzoz subabı kapanır ve emme subabı yakıt ve hava karışımını silindir içerisine alır. Böylece emme stroku gerçekleşmektedir. Egzoz subabının açıldığı süreçte silindirin içine dolan yakıt-hava karışımının reaksiyona girmesi sonucunda oluşan basınç atmosferik basınç değerinin üstünde bir değer almaktadır. Emme sürecinde ise bu değer atmosferik basınç değerinin altına düşmektedir(şİMşEK & olak, 2019).

1.4.1.Dizel Motorlarda Yanma

Dizel yakıt kullanılan motorlarda yanma reaksiyonu gaz ve havanın sıkıştırılmasının son aşamasında silindirin emme subabını açtığı süreçte sıcaklık derecesi 600-900 C°'ya çıkmaktadır. Bu sıcaklık değeri ve basıncın artmasıyla birlikte hava ile

enjektörün püskürttüğü yakıtın karışması sonucunda yanma gerçekleşmektedir(Akgün et al., n.d.).

Şekil 1.7’de dizel motorlarda yanma gösterilmektedir. Söz konusu görselde de görüldüğü üzere dizel yakıt kullanılan motorlarda yanma aşamalı olarak gerçekleşmektedir. Yakıtın püskürtülmesinin ardından ateşlenmesi için oksijen ile reaksiyona girmesi ve belirli bir sıcaklık değerinin oluşması gerekmektedir. Görselde görüldüğü üzere bu proses A ve B noktaları arasında gerçekleşmektedir. Bu süreç için geçen süre tutuşma gecikmesi olarak adlandırılmaktadır. B ve C noktaları arasındaki süreçte püskürtülen yakıtın ısınmasının ardından oksijen ile buluşması ile yakıt buharlaşmaktadır. Bu proses hızlı yanma olarak adlandırılmaktadır. Ateşlemenin gerçekleşmesi ile birlikte silindirin içine püskürtülen yakıtın tamamı yanma reaksiyonuna dahil olmaktadır. Yanma reaksiyonu ile birlikte ortaya çıkan basıncın sonucu olarak vuruş gerçekleşmektedir. Vuruntunun önlenmesi için yakıtın daha az rafine edilmesi önem arz etmektedir. Bu bağlamda hareketin ilk sürecinde daha az yakıt püskürtülmesi gibi çeşitli çözümler üretilmiştir. Hızlı yanmanın sonucunda meydana gelen sıcaklık ve basıncın etkisi dolayısıyla silindire püskürtülen yakıtın devamı gecikmesiz olarak yanmayı sürdürmektedir. Bu proses ise kontrollü yanma olarak adlandırılmaktadır. Görselde D ve E noktaları arasında yakıtın püskürtülmesinin sona ermesiyle birlikte pistonun hareketi aşağı yönlü olacak şekilde devam etmektedir. Bu süreçte yanmamış yakıt ile oksijen birleşir ve yanma reaksiyonu devam etmektedir. Bu proses ise gecikmiş yanma olarak adlandırılmaktadır(Akgün et al., n.d.).



Şekil 1.7. Dizel motorlarda yanma

Benzinli motorlarda pistonun gel-git şeklinde hareketi esnasında sıkıştırma stroku boyunca yakıt ve oksijen karışımı sıkıştırılmaktadır. Dizel motorlar, benzinli motorlardan farklı olarak bu süreçte yalnızca oksijeni sıkıştırmaktadır. Dolayısıyla yakıt olarak benzin kullanılan motorlarda kendiliğinde tutuşma söz konusu olmasına karşın bu durum dizel yakıt kullanılan motorlarda geçerli olmamaktadır. Benzinli motorlara kıyasla dizel motorlarda sıkıştırma oranı daha yüksek olmaktadır. Bu durum dolayısıyla dizel yakıtlı motorlar benzinli motorlara kıyasla daha verimlidir. Ayrıca dizel motorlar, buji ateşlemeli motorlara kıyasla daha düşük devir sayısında çalışmaktadır. Bu nedenle yanma açısından daha verimlidir(Akgün et al., n.d.).

1.4.2.Dizel Yakıtların Özellikleri

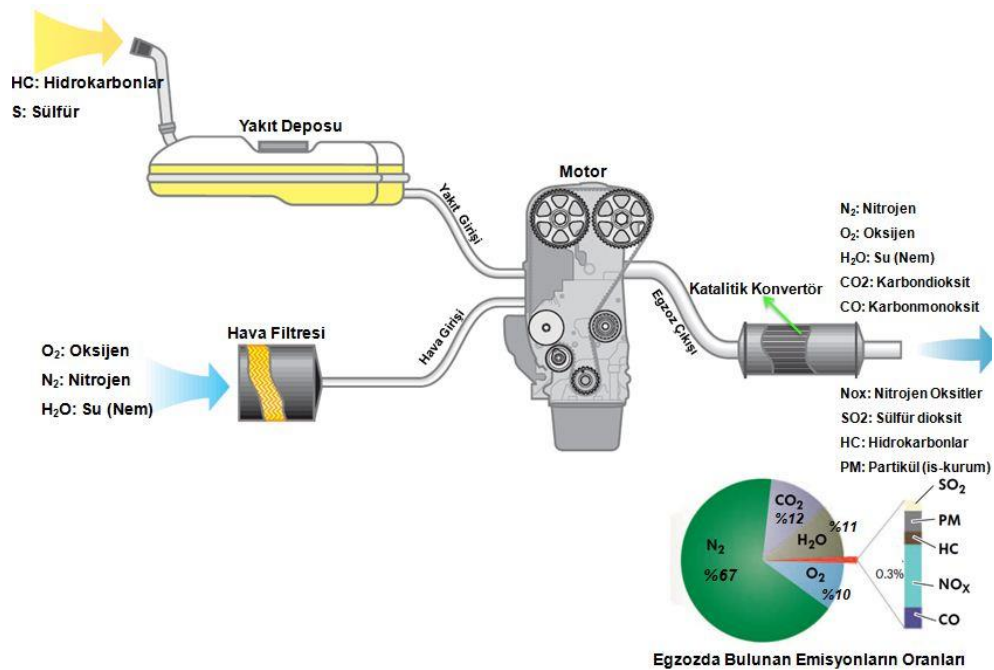
Yaygın olarak kullanılan yakıt türlerinden biri olan dizel yakıtlar ham petrolün 200 ile 390 °C sıcaklıkta damıtılması sonucunda elde edilmektedir. Yapısını hidrokarbonlar meydana getirmektedir. Yakıtlarda parafin hidrokarbon miktarı gibi çeşitli kimyasal özellikler kullanıldığı motorda emisyon ve performans açısından belirleyici olmaktadır. Yakıtta parafin hidrokarbon miktarının yüksek olması yakıtta setan sayısının daha fazla olması neden olmaktadır. Buna bağlı olarak yakıtın verimliliği de

artış göstermektedir. Ayrıca yakıtların fiziksel özellikleri yanma reaksiyonunun verimliliği açısından etkili olmaktadır(DeMarini et al., 2019).

Yakıtlarda setan sayısının artmasının sonucu olarak tutuşmanın gecikme oranı azalmaktadır. Buna bağlı olarak dizel yakıtlarda vuruntu meydana gelmesi düşük olmaktadır. Ayrıca motorun kullanılma verimliliği açısından oldukça etkili olmaktadır. Dizel yakıtın viskozite değerinin fazla olması durumunda yanma reaksiyonunun gerçekleştiği odaya alınması zorlaşmaktadır. Bu nedenle tutuşma gecikme süreci artmasının yanı sıra ayrıca is oluşmaktadır. Yanma reaksiyonunun sonucunda is oluşumunun standartlara uygunluğunun sağlanabilmesi için dizel yakıtların setan sayısının 70'den az olması gerekmektedir. Bununla birlikte 40'ın üstünde olması gerekmektedir. Dizel yakıtlar düşük sıcaklık değerlerinde tutuşabilmektedir. Fakat buharlaşma kapasitesi düşüktür. Bu nedenle alevlenme tehlikesi az olmaktadır(Akgün et al., n.d.).

1.4.3.Dizel Motorlarda Emisyon

İnsan sağlığının ve çevrenin korunabilmesi açısından emisyon çalışmaları sürdürülmeye devam etmektedir(ŞİMŞEK & Çolak, 2019). Şekil 1.9'da dizel motorların kirlетici etkileri gösterilmektedir.



Şekil 1.8. Dizel Motorların Kirlетici Etkileri

İçten yanmalı motorlar çevre kirliliğine neden olmaktadır. Bunun nedeni ise yakıtın yanması ya da buharlaşması olmaktadır. Motorlu taşıtlar kaynaklı olarak şu emisyonlar ortaya çıkmaktadır:

- CO
- HC
- NO_x
- SO_x
- Partikül maddeleri

Motorlu taşıtlar kaynaklı olarak ortaya çıkan kirletici bu emisyonlara egzoz gazı ürünleri adı verilmektedir. Yakıtlardan kaynaklı emisyonlar ise SO_x ve kurşun bileşikleri olmaktadır. Yakıt ve oksijenin reaksiyona girdiği süreçte yanma ürünü olarak yakıtın içinde bulunan kükürt miktarı SO_x (Kükürt dioksit) emisyonu için belirleyici olmaktadır(DeMarini et al., 2019).

Benzinli motorlarda CO (Karbonmonoksit) ve HC (Hidrokarbon) daha yüksek oranda salınım göstermektedir. Dizel motorlarda ise partikül maddeler ve NO_x (Azot oksit) emisyonu daha yüksek oranda gerçekleşmektedir(Kırıkkale Üniversitesi, 2016). Emisyonların azaltılabilmesi ve kaliteli bir yanma gerçekleştirilebilmesi için kullanılan yakıtların atomizasyonunun iyi olması gerekmektedir.

1.4.3.1.CO_x Oluşumu

Silindirin içine yanma reaksiyonu için dahil edilen yakıtın belirli bir miktarı yanma reaksiyonun gerçekleştiği sırada yeterli miktarda oksijen ile karışmadığı takdirde tam yanma gerçekleşmemektedir. Bunun sonucunda zehirli bir gaz olan CO_x emisyonu ortaya çıkmaktadır(Akgün et al., n.d.).

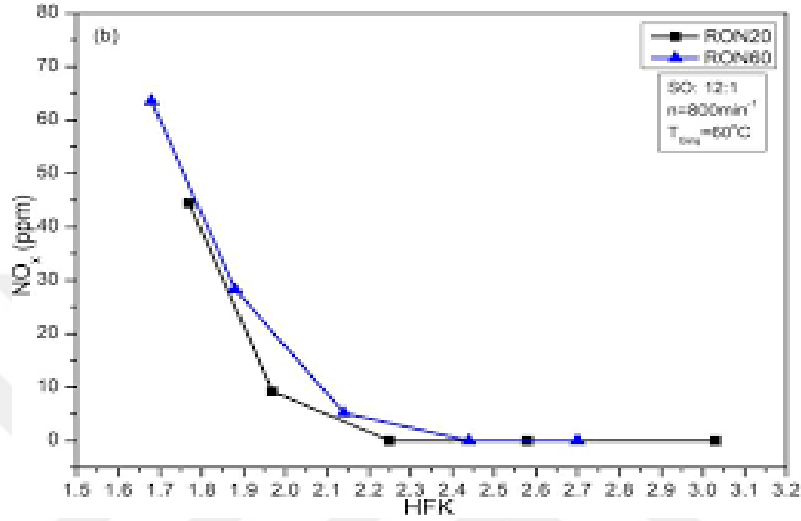
1.4.3.2.HC Oluşumu

Motorlu taşıtların neden olduğu HC emisyonu motorda kullanılan yakıtın eksik yanması ve dolayısıyla oluşan buharın salınımından oluşmaktadır(Kırıkkale Üniversitesi, 2016). HC oluşumu yanma odasında boşlukların olması durumunda gerçekleşmektedir. Çeşitli eksikliklere bağlı olarak tam yanma gerçekleşmemesi durumunda HC emisyonu gerçekleşmektedir. Bu nedenler şunlardan oluşmaktadır:

- Hava-yakıt oranı

- Egzoz gazı geri çevrim miktarı
- Ateşleme zamanı

HC emisyonu aynı zamanda zengin karışımda oksijenin fazla olması durumunda da meydana gelebilmektedir. Hava fazlalığı katsayısına bağlı olarak artış gösteren HC emisyonuna ilişkin detaylar Şekil 1.9’da yer almaktadır(DeMarini et al., 2019).



Şekil 1.9. Hava fazlalık katsayısı ve HC emisyonu ilişkisi

1.4.3.3.NO_x (Azot Oksit) Oluşumu

Dizel motorlarda en yüksek oranda emisyon olan ürün NO_x olmaktadır. Bunun sebebi ise silindir içerisinde sıcaklık miktarının 1800 °C üstüne çıkması olmaktadır. Mekanik iş gerçekleştirme sürecinde karışan hava ve yakıt miktarı artması sonucunda sıcaklık ve dolayısıyla basınç da artış göstermektedir. Buna bağlı olarak NO_x emisyonu da artış göstermektedir(Akgün et al., n.d.).

Zengin olmayan karışımlarda NO_x emisyonu azaltılabilmektedir. Dizel motorlarda yakıtın düzgün püskürtülmemesi durumunda NO_x emisyonundaki azalma miktarı düşük olmaktadır(Şimşek et al., n.d.). NO_x emisyonunda en önemli faktörlerden birisi dizel yakıtların setan sayısı olmaktadır. Bu bağlamda yakıtın setan sayısı yüksek olması durumunda tutuşma gecikmesi gerçekleşmektedir. Yanmanın gerçekleştiği odada bulunan fazla yakıt aniden tutuşması sonucu basınç değerinde artış söz konusu olmaktadır. Basıncın artması dolayısıyla yakıt olması gereken süreçten daha erken tutuşmaktadır. Ancak bu süreçte sıkıştırma işlemi devam etmektedir. Bu nedenle silindir içerisindeki sıcaklık artmakta ve dolayısıyla NO_x emisyonu artmaktadır(Şimşek et al.,

n.d.). Şekil 1.10’de NO_x emisyonu kontrol yöntemlerinin uygulanması sonucunda ortaya çıkan değişiklikler gösterilmektedir.

NO _x Emisyonu			
Standart Ayar (% 100)			
Sıkıştırma Oranının Artırılması			% 80
Püskürtme Avansının Azaltılması		% 55	
EGR	% 25		
Su Püskürtülmesi	% 30		
EGR+Su püskürtülmesi	% 20		
Tüm Yöntemler+Katalitik Konvertör	% 5		

Şekil 1.10. NO_x Emisyonu Kontrol Yöntemleri ve Etkileri

1.4.3.4.SO_x Oluşumu

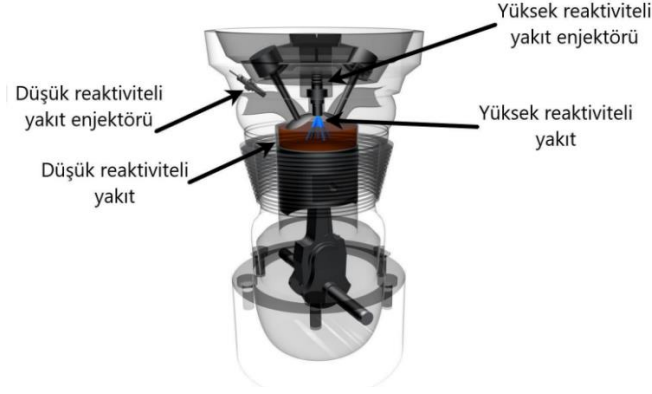
Dizel motorlarda oluşan emisyonlardan biri olan SO_x kullanılan yakıt içerisinde yer alan kükürt miktarı, motorda kullanılan yağ gibi faktörlere bağlı olarak meydana gelmektedir. Bununla birlikte SO_x sülfürik asit oluşumuna da neden olabilmektedir. Böyle bir durum gerçekleşmesi durumunda motorda aşınmaya bağlı olarak tahribat söz konusu olabilmektedir. SO_x emisyonunun azaltılabilmesi için motorda kullanılan yakıt içerisinde yer alan kükürt miktarının azaltılması sağlanabilir.

1.5. RCCI Yanma Mekanizması

RCCI alternatif yakıt kullanımı ile gündeme gelmiştir. Temel olarak ısı yayma oranı ve yanma aşamasını kontrol altına almak amacıyla avantaj sağlayan yanmanın çift yakıtlı olarak ve düşük sıcaklıkta gerçekleştirilmesini kapsayan bir strateji olarak tanımlanmaktadır(Sürmen et al)Bu mekanizma yakıt yönetimi açısından değerlendirildiğinde şu avantajları sağlamaktadır(AKTAŞ ve Oğuzhan DOĞAN et al., 2010):

- Tüm motor yüklerinde uygulanabilmektedir
- Geliştirilmiş motor performansı sağlamaktadır
- Emisyon avantajı sağlamaktadır
- Alternatif yakıt kullanımı açısından etkili olmaktadır.

Şekil 1.11’de RCCI Yanma Mekanizması gösterilmektedir.



Şekil 1.11. RCCI Yanma Mekanizması

RCCI reaktivite değeri farklı olan iki yakıtın kullanımı, yakıt karışımı, yakıtın yanması, süresi ve reaktivite değerlerinin kontrol edilebilme imkânı sunan bir teknolojidir. Manifoldundan düşük reaktiviteli yakıtın giriş stoku esnasında silindirin içerisinde yer alan hava ile karışımının ardından yüksek reaktiviteli yakıt, direkt enjektör aracılığıyla enjekte edilmesi sonucunda RCCI yanması gerçekleşmektedir (Kaleli et al., n.d.). RCCI mekanizmasının kapsadığı çift enjeksiyon yönteminin HRF olarak kullanılan yakıtın ezme bölgesinde reaktiviteyi arttırması ve böylece yanmayı teşvik etmesi sonucunda yanmamış CO ve HC elde edilmektedir(Násner et al., 2017).

1.6. İlgili Araştırmalar

Ulaşım sektörü, küresel enerji kullanımı ve sera gazı emisyonlarının önemli bir payını oluşturmaktadır(Ahmadi et al., 2018). Bu nedenle, sıkı emisyon zorunluluğunu karşılayarak, yüksek enerji verimliliğine ulaşmak, güvenli, sürdürülebilir ve kapsayıcı ekonomik büyümeyi garanti etmeye yönelik herhangi bir strateji oldukça önem arz etmektedir(Oo et al., 2022)İlerleyen teknolojiler içten yanmalı (IC) motorlarda yakıt reformasyonu, motor teknolojileri ve yanma sonrası işlemler olarak geniş bir şekilde kategorize edilebilir. Elektronik motor yönetim sistemlerinin gelişmesi, yakıt verimliliğini önemli ölçüde iyileştirmiş ve otomotiv motorlarından kaynaklanan kirletici emisyonları azaltmıştır. Sıkıştırma ateşlemeli (dizel) motorlar, kıvılcım ateşlemeli (benzinli) motorlardan daha yüksek termal verime ve yakıt verimliliğine sahip olsa da, geleneksel dizel çalışma modu altında, yanma odası bölgeleri genellikle zengin ve yüksek sıcaklıkta dolguya maruz kalır ve bu da kurum ve NO_x emisyonu oluşumuna yol açar. Dizel motorlarının karşılaştığı en büyük zorluk, NO_x ve isin arasındaki dengedir. Dizel motorlarda yanma konusundaki son araştırmalar, motor verimliliğini en üst düzeye

çıkarmak ve egzoz emisyonlarını en aza indirmek için yanma sıcaklığını düşürme nihai hedefi ile gelişmiş yanma stratejileri için kullanılan genel bir terim olan düşük sıcaklıkta yanmaya (LTC) odaklanmıştır(Heidari-Maleni et al., 2021; Shanmugam et al., 2021).NO_x ve is'in silindir içinde azaltılmasına ilişkin mevcut yakma stratejilerinin çoğu, soğuk EGR kullanımı veya çalışma rejimi yoluyla düşük sıcaklığı koruyarak NO_x ve is oluşum bölgelerini baypas etmeyi hedefleyen önceden karıştırılmış LTC alanına yoğunlaşmıştır. 1'den yüksek hava fazlalık katsayısı ile 2000 K'dan düşük yanma sıcaklıkları NO_x oluşumunu azaltır, çünkü NO oluşum reaksiyonları yüksek aktivasyon enerjisi gerektirir(Akif Ersoy Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi Özel Sayı et al., 2017).Birçok araştırmacı, NO_x ve is'in aynı anda azaltılması için ön karışımli sıkıştırılmalı ateşleme (PCCI) ve homojen dolgulu sıkıştırılmalı ateşleme (HCCI) uygulamaları başarıyla uygulanmıştır(HAŞİMOĞLU et al., 2002; Nazemi & Shahbakhti, 2016)Tüm LTC stratejileri, daha uzun bir tutuşma gecikme süresine veya pozitif bir tutuşma beklemesine (yakıt enjeksiyonunun sonu ile yanmanın başlaması arasındaki zaman gecikmesi) yol açar(Li et al., 2017; Singh et al., 2020).RCCI, farklı reaktiviteye sahip iki yakıtın kullanıldığı benzer LTC stratejilerinden biridir(Tesfa et al., 2013). Dizel benzeri yakıtlar veya benzeri düşük kendiliğinden tutuşma sıcaklığına sahip yakıtlara, yüksek reaktiviteli yakıt ve benzin benzeri yakıtlar daha yüksek kendiliğinden tutuşma sıcaklığına sahip, düşük reaktiviteli yakıt olarak adlandırılır.

Biyodizel, hayvansal veya bitkisel yağlar gibi yenilenebilir kaynaklardan elde edilen alternatif bir dizel yakıttır. Kimyasal olarak ise uzun zincirli yağ asidi mono alkil esteri olarak tanımlanabilir. Biyodizel bitkisel veya hayvansal yağların bir alkol ve katalizör ile reaksiyona sokulmasıyla üretilir. Atık bitkisel ve hayvansal yağlar da biyodizel hammaddesi olarak kullanılabilir (Eswaran et al., 2021; Ma et al., 2018). Fiziksel ve kimyasal özellikleri bakımından petrol kökenli dizel yakıtlarla benzerlik göstermektedir. Biyodizel, yenilenebilir olması ve egzoz emisyonlarında fosil yakıtlarına göre daha az hidrokarbon (HC), karbonmonoksit (CO), kükürt dioksit (SO₂) ve partikül içermesi sebebiyle alternatif yakıt olarak tercih edilmektedir(Liu et al., 2021; Tarabet et al., 2012; Vijayakumar et al., 2016)Çevre dostu yakıt olan biyodizelin üretilebilmesi için yağ içeriği yüksek yağ bitkilerinin yetiştirilmesine ihtiyaç vardır. Bu amaçla her ülke kendi yerel şartlarına en uygun yağ bitkilerini gıda sektöründe bir açık meydana getirmeden yetiştirmek zorundadır.

Bu çalışmanın amacı; aspir yağından üretilen biyodizelin yüksek oranlarda dizel motorlarda kullanımı imkanlarının geliştirilmesini sağlamak için viskozitesi daha düşük

olan dietileter kullanılmasının yanı sıra bir RCCI uygulaması ile motor veriminin artırılmasının ve NOx ile is emisyonlarının azaltılmasına yöneliktir.

2. MATERYAL VE YÖNTEM

Aspir bitkisinin kurak koşullarda canlılığını sürdürebilmesi ve dayanıklı bir bitki olması sebebiyle önemi gittikçe artmaktadır (Sajedi et al., 2012) Bu nedenle son zamanlarda ülkemizde de yetiştiriciliği yaygınlaşmaktadır. Bu amaçla deneylerimizde aspiden üretilen olan biyodizel tercih edilecektir.

Biyodizel için EN 14214 Avrupa Birliği Standardı ile ASTM D 6751 Amerikan Standardı yürürlükte. Türkiye'de EN 14214 Standardı temel alınarak TSE Standardı hazırlanmaktadır. Çalışmada kullanılmak üzere literatür taraması yapılarak uygun transesterifikasyon uygulamalarından biri kullanılarak biyodizel üretimi yapılacaktır.

Yapılması planlanan deneylerde kullanılacak olan dizel yakıtı, biyodizel ve dietileterden oluşacak olan yüksek reaktiviteli yakıt grubuna giren deneysel yakıtlarımızın oranları aşağıda verilmiştir. Düşük reaktiviteli yakıt olarak ise LPG sabit %50 oranında emme manifolduna gönderilecektir.

- 1) %100 Dizel yakıtı
- 2) %100 Biyodizel
- 3) %95 Biyodizel & %5 Dietileter
- 4) %90 Biyodizel & %10 Dietileter
- 5) %85 Biyodizel & %15 Dietileter

Biyodizel, ve dietil eter yakıtlarının karıştırılması ile ana yakıtın reaktivitesi artırılarak ilk tutuşturmanın kolaylaştırılması hedeflenmektedir.

Her deney yakıtı ayrıca 2 farklı motor çalışma koşulunda yapılacaktır.

- a) Motor sabit devirde iken : 1500 dv/dk
- b) Motor yüklü durumdayken: (7,2 kW orta yük)
- c) RCCI modu %50

Deneyler yapılırken araştırılacak olan parametreler aşağıda sınıflandırılmıştır;

Performans (yakıt tüketimi, özgül yakıt tüketimi, termal verim, egzoz sıcaklığı)

Yanma Verileri (basınç, ısı yayılımı, kütleli yanma oranı, ortalama gaz sıcaklığı, ısı transfer katsayısı)

Emisyon (CO, HC, NO_x, CO₂)

Bu çalışmada Batman Üniversitesi Makine Mühendisliği Motor Test Laboratuvarında bulunan tek silindirli dizel bir motoru kullanılacaktır. Deneylerin yapılacağı tek silindirli dizel motorun teknik özellikleri Tablo 2.1’ de verilmiştir.

Tablo 2.1 Deneylerde kullanılan dizel motorun özellikleri

İmalat	DDJ9500 E	
Güç Çıkışı	15 HP	
Anma Hızı (rpm)	1500	1800
Anma Gücü (kw)	7,5	8,2
Max Güç	8,2	9
Yakıt Tüketimi	<270 kg/kWh	
Motor Soğutma Sistemi	Hava Soğutmalı	
Emme Sistemi	Doğal Emişli	
Motor Modeli	DDM192FE	
Çap*Strok (mm)	92*75	
Silindir Hacmi (cm ³)	498	
Silindir Sayısı	1	
Tutuşturma Sistemi	Direkt Enjeksiyonlu	
Sıkıştırma Oranı	19:1	

Motorun yanma ve performans değerleri bilgisayar destekli yanma analizi kontrol ünitesi yardımıyla tespit edilecektir. Yakıtların emisyon değerlerinin ölçüleceği CAPELEC CAP3200 marka emisyon ölçüm cihazının teknik özellikleri Tablo 2.2’ de verilmiştir. Egzoz sıcaklık ölçümü temassız kızılötesi sıcaklık ölçerle tespit edilecek. Gerçekleştirilmesi planlanan çalışmada kullanılacak deney düzeneğinin diyagram şeması Şekil 2.1.’ de gösterilmiştir.

sistemlerdeki ideal gaz kanunu göz önüne alınarak ısı salınım hızı denklem kullanılarak belirlenmiştir. Isı salınım hızı, yanma odasındaki enerji yayılımının geçici olarak izlediği yol olarak tanımlanır.

Isı salınım hızının integrali, toplam ısı salınımı veya yanma fonksiyonu olarak düzenlenmiştir.

$$\frac{dQ}{d\theta} = \frac{\gamma}{\gamma-1} P \frac{dV}{d\theta} + \frac{1}{\gamma-1} V \frac{dP}{d\theta} \quad (2.1)$$

Denklem (2.1) deki birikmiş ısı salınımının hesaplanmasında kullanılır.

$$\int dQ = \int \left(\frac{\gamma}{\gamma-1} \right) p(dV) + \int \left(\frac{1}{\gamma-1} \right) V(dP) \quad (2.2)$$

Burada;

γ : 1.32 olarak alınan özel bir sıcaklık oranı

θ : Krank açısı

P : Silindir gaz basıncı

V : Silindir hacmidir.

Burada;

Basınç verisi basınç sensöründen ayrılmıştır ve V ve $dV/d\theta$ terimleri aşağıdaki denklem ile hesaplanmıştır:

$$V = V_c + A \cdot r \left\{ 1 - \cos \left(\frac{\pi A}{180} \right) + \frac{1}{\lambda} \left(1 - \sqrt{1 - \lambda^2 \sin^2 \left(\frac{\pi \theta}{180} \right)} \right) \right\} \quad (2.3)$$

$$\frac{dV}{d\theta} = \left(\frac{\pi A}{180} \right) \times r \left\{ \sin \left(\frac{\pi \theta}{180} \right) + \frac{\lambda^2 \sin^2 \left(\frac{\pi \theta}{180} \right)}{2x \sqrt{1 - \lambda^2 \sin^2 \left(\frac{\pi \theta}{180} \right)}} \right\} \quad (2.4)$$

$$\lambda = \frac{l}{r} \text{ ve } A = \frac{\pi D^2}{4}$$

Burada;

r krank yarıçapı =H/2,

l biyel kolu uzunluğu,

D silindir çapı ve

Vc ise strok hacmidir.

Isı transfer katsayısı (J) Hohenberg bağıntısına dayanarak silindir duvarından hesaplanır.

$$\frac{dQ_w}{d\theta} = hA(T - T_w) \quad (2.5)$$

Aşağıdaki denklem ortalama gaz sıcaklığına bağlı olarak özgül sıcaklık oranını verir.

$$\gamma = 1,338 - 60 \times 10^{-5}T + 10^{-8}T^2 \quad (2.6)$$

Hohenberg ısı transfer katsayısı aşağıda verilen denklem ile yanma analizlerinde kullanılır.

$$h_c = C_1 V^{-0.06} P^{0.8} T^{-0.4} [C_m + C_2]^{0.8} \quad (2.7)$$

Burada h_c ısı transfer katsayısı, V anlık silindir hacmi, P anlık silindir basıncı, T ortalama gaz sıcaklığı, C_m ortalama piston hızını ve C_1 ile C_2 değerleri ise deneysel olarak bulunan sırasıyla 13×10^{-3} ve 1.4 sabitleridir.

Vuruntu yoğunluk analizi aşağıdaki denklem ile hesaplanır.

$$dp(\theta) = \frac{[86(p_{i-4} - p_{i+4}) + 142(p_{i+3} - p_{i-3}) + 193(p_{i+2} - p_{i-2}) + 126(p_{i+1} - p_{i-1})]}{1118 d\theta} \quad (2.8)$$

Burada;

γ özgül sıcaklık katsayısıdır,

Q belirgin ısı salınım hızı deneysel denklem ile elde edilen (J) ile hesaplanır.

P Silindir basıncı (bar),

V silindirin anlık hacmi (m^3) ve

Q_w sıcaklık transfer katsayısı,

J ise Hohenberg bağıntısına dayanarak silindir duvarından hesaplanır.

Ortalama gaz sıcaklığı sonuçları yanma odasındaki gaz sıcaklığının bölgesel ortamlarından alınır. Yanma odası sistemi genellikle ideal karışım olarak görüldüğünden ortalama gaz sıcaklığı ideal gazlar için durum denklemi ile kolaylıkla bulunur. Piston ve silindir için genellikle lokal sabit ısı kullanılır. Genleşme stroku politropik olduğu kabul edilmekte ve sıradaki denklem kullanılarak ortalama gaz sıcaklığı hesaplanır.

$$T_i = P_i V_i \frac{T_{ref}}{P_{ref} V_{ref}} \quad (2.9)$$

Burada, T_i ; ortalama gaz sıcaklığı, P_i ve V_i eşzamanlı basınç ve silindir hacmini; T_{ref} , P_{ref} ve V_{ref} politropik genleşme eğrisinin herhangi bir noktasındaki referans parametreleridir.



3. DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA

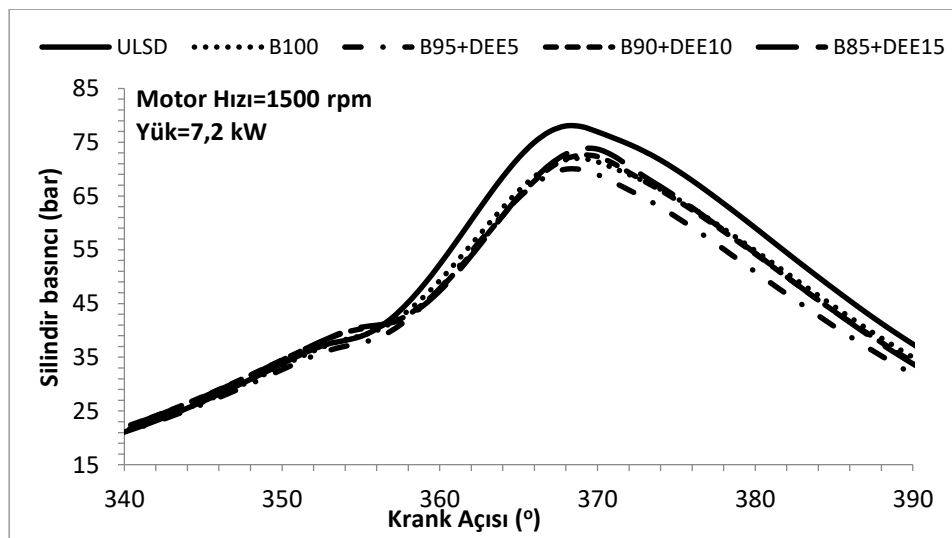
3.1.Silindir Basıncı

Silindir basınç değerleri 7,2 kW yükler, 1500 rpm motor çalışma koşullarında Dietil miktarının değişimine bağlı olarak farklı yakıtlar için yapılmıştır. İkincisi ise B85+DEE15 RCCI çalışma modu için sıkıştırma oranının farklı sıkıştırma oranlarına etkisini ortaya çıkarmak amacıyla yük ve motor devri sabit tutularak gerçekleştirilmiştir. Her iki deneyde de referans yakıt olarak ULSD kullanılmıştır. Her iki test koşulunda da çeşitli DEE RCCI miktarları için farklı krank açıları ile silindir içi basıncın değişimleri sunulurken, krank açısına karşı döngüsel kütle yakıt dönüşüm verimliliği (FCR_{mf,P}) değerleri sunulmaktadır.

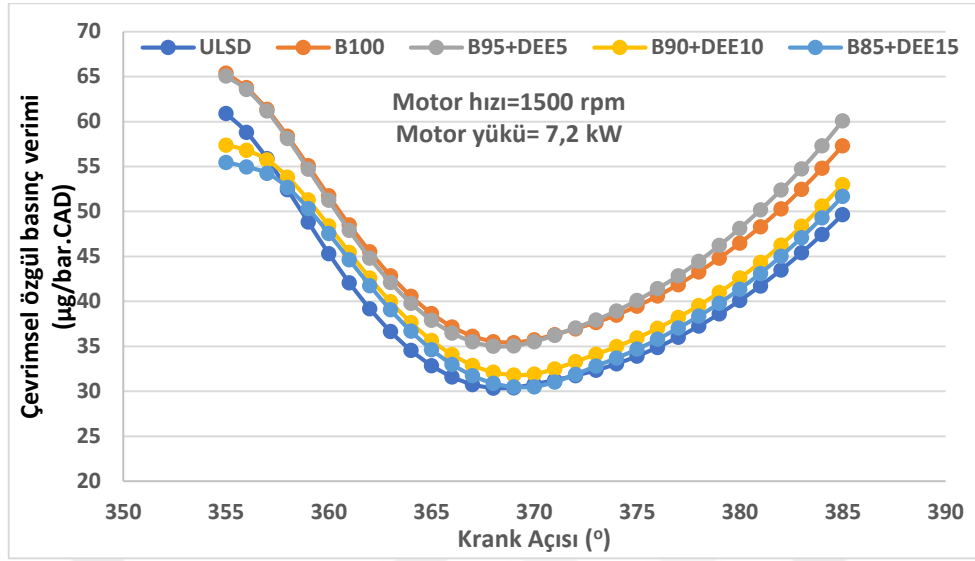
ULSD için en yüksek silindir basınç değerleri B90+DEE10 ve B85+DEE15 RCCI çalışma modları için elde edilmiştir. B90+DEE10 ve B85+DEE15 RCCI çalışma modları, RCCI stratejisinin oldukça verimli olduğunu görülmüş ve yanma göstergelerinin ile performans parametrelerinin iyileştiği görülmektedir.

Şekil 3.1 de de görüleceği gibi farklı sıkıştırma oranları için biyodizel/DEE RCCI uygulamasının şiddet değerleri sıkıştırma oranına bağlı olarak artmıştır. Sıkıştırma oranı arttıkça şiddet değerleri arttı. Ancak artış, vurutuyu temsil eden bu parametre için çok yüksek değildi. Bu nedenle artan değerler yanma ve vurutu sorunu açısından bir sorun teşkil etmemiştir.

Bu aynı zamanda B85+DEE15 RCCI çalışma modu ve ULSD için oluşturulmuş standart P&V diyagramlarıyla da desteklenebilir. Şekil 1.3 deki P&V diyagramlarındaki alanlar da görülebilir (Hammerschlag, 2006).



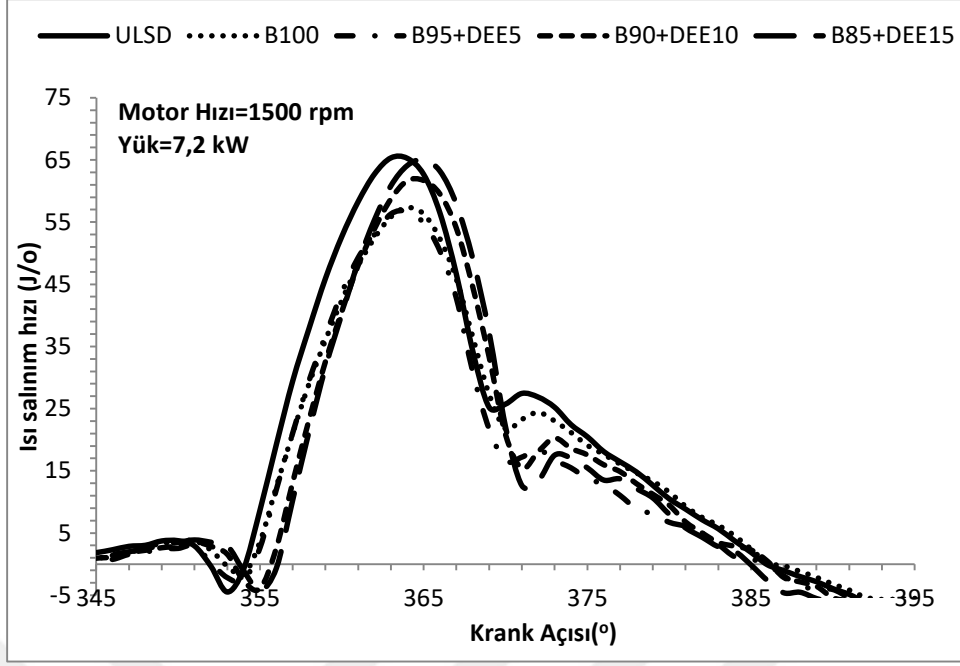
Şekil 3.1. Silindir basıncı değerlerinin krank açısına bağlı farklı çalışma koşulları için değişimi



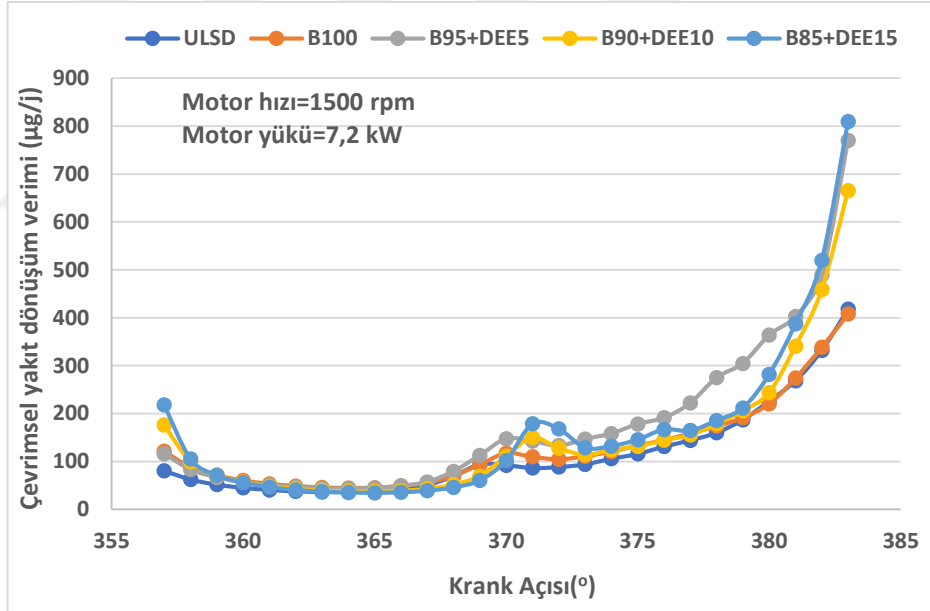
Şekil 3.2. Çevrimsel özgül silindir basıncı değerlerinin krank açısına bağlı farklı çalışma koşulları için değişimi

3.2. Isı salınım hızı

Farklı biyodizel/DEE RCCI miktarları için farklı krank açlarına sahip HRR ve FCRmf, HRR varyasyonları Şekilde 3.2 gösterilmektedir. Ancak B90 + DEE10 ve B85 + DEE15 RCCI durumları için ısı yayma oranı değerlerinin dizel yakıtı göre daha yüksek tepe değerlerine sahip olduğu görülmektedir. Ayrıca bu yakıtlar için yanmanın biraz daha geç başladığı görülmektedir. Bu, tutuşma gecikmesini artıran DEE'nin düşük reaktivitesine bağlanabilir. Ancak bu durum FCRmf, HRR eğrilerinden daha net anlaşılabılır. FCRmf, HRR eğrilerine baktığımızda tüm eğrilerin çok benzer olduğu ve bir CAD için birim ısı çıkış hızı için tüketilen yakıt miktarının hemen hemen aynı olduğu görülmektedir. Bu durumda DEE miktarının performans açısından olumsuz bir durum oluşturmadığı ortaya çıkıyor. Farklı sıkıştırma oranları için HRR değerlerine baktığımızda sıkıştırma oranının azalmasıyla bu değerlerin düştüğü Şekil 3.4 de görülmektedir. Ayrıca yanmanın daha sonra başladığı açıkça görülmektedir. Bu motor performansını olumsuz etkiler. Olumsuz durum FCRmf, HRR eğrileri ile daha iyi açıklanabilir. Bu eğrilere baktığımızda sıkıştırma oranının azalmasıyla birim krank açısı başına tüketilen yakıtın arttığı ve dolayısıyla performansın düştüğü sonucuna varılmıştır.



Şekil 3.3. Isı salınım hızı değerlerinin krank açısına bağlı farklı çalışma koşulları için değişimi



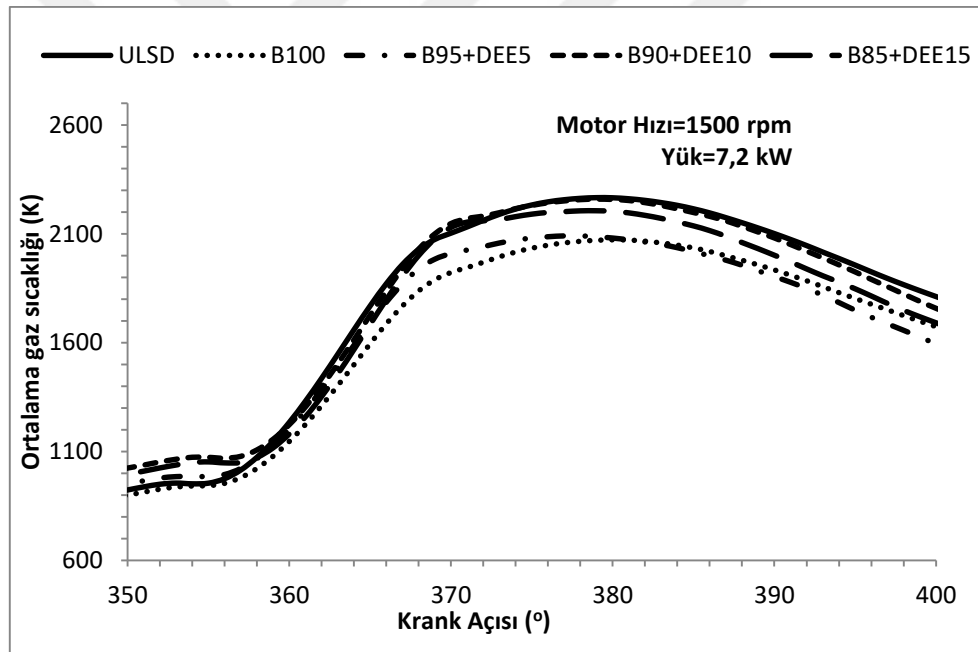
Şekil 3.4. Çevrimsel özgül ısı salınım hızı değerlerinin krank açısına bağlı farklı çalışma koşulları için değişimi

3.3.Ortalama Gaz Sıcaklığı

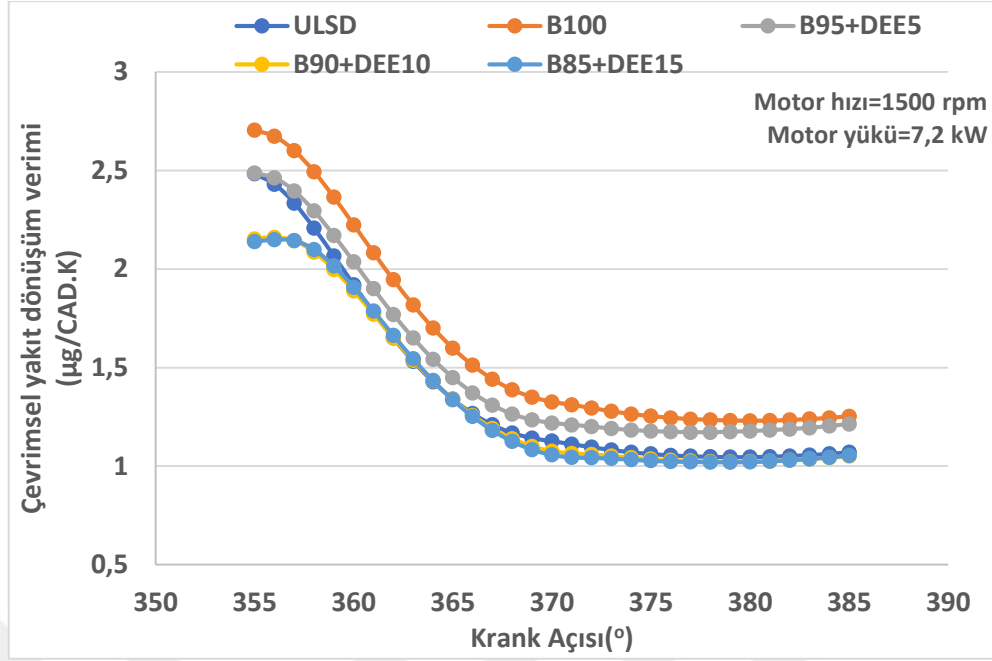
Çeşitli biyodizel/DEE RCCI miktarları için farklı krank açılarına sahip MGT ve FCRmf, T varyasyonları Şekil de görülmektedir. En yüksek ortalama gaz sıcaklık değerlerinin B100 yakıtı için elde edildiği görülmektedir. Bu durum biyodizelin adyabatik alev sıcaklığı değerlerinin daha yüksek olmasına bağlanabilir. Ancak DEE kullanıldığında biyodizelin yüksek gaz sıcaklık değerlerinin düştüğü ve dizel yakıtı

yaklaştığı görülmektedir. Farklı DEE miktarları ile RCCI çalışma koşulları karşılaştırıldığında, tüm yakıtlar için birim CAD başına ortalama gaz sıcaklığı değerlerinin artış oranları benzerdi. Ancak B95+DEE5 için diğer durumlara göre daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir.

Farklı sıkıştırma oranı koşulları değerlendirildiğinde, sıkıştırma oranının doğal olarak azalmasıyla ortalama gaz sıcaklığının düştüğü Şekil 3.5 de açıkça görülmektedir. En düşük ortalama gaz sıcaklığı değerleri 13:1 sıkıştırma oranı durumunda elde edilmiştir. MGT ve FCR_{mf,T}'nin farklı sıkıştırma oranı değerleri için farklı krank açılarına sahip varyasyonları karşılaştırıldığında, sıkıştırma oranı azaldıkça bu değerlerin doğal olarak azaldığı görülmektedir. Ancak en yüksek değerlerin B95+DEE5 için 19 sıkıştırma oranında elde edildiği görülmektedir. Bu, biyodizelin yüksek alev sıcaklığına bağlanabilir.



Şekil 3.5. Ortalama gaz sıcaklığı değerlerinin krank açısına bağlı farklı çalışma koşulları için değişimi



Şekil 3.6. Çevrimsel özgül gaz sıcaklığı değerlerinin krank açısına bağlı farklı çalışma koşulları için değişimi

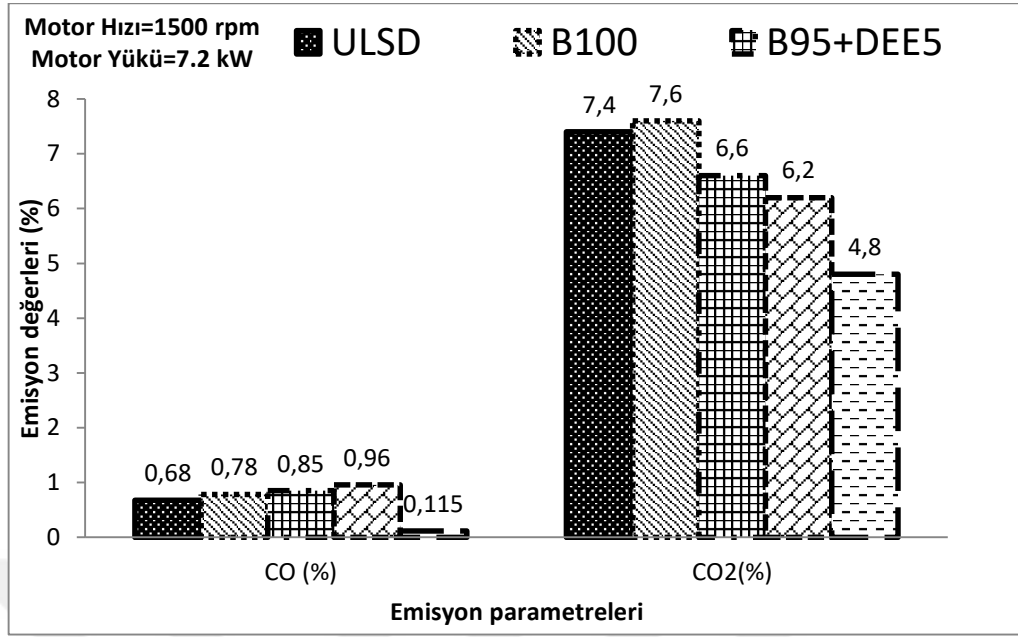
3.4.Emisyon Parametreleri

3.4.1.Karbonmonoksit

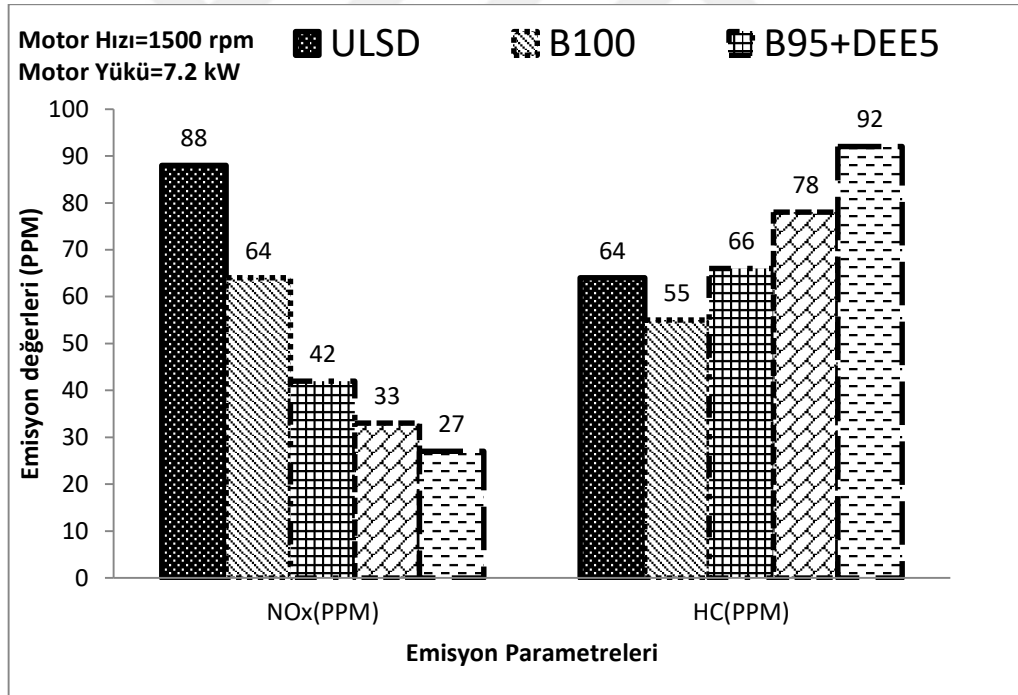
7,2 kW yük uygulamasında CO emisyonu %100 birincil yakıt kullanımında biyodizel yüzdesinin artışıyla genel olarak artışa neden olmuş, saf dizel ve B100 de % 0,78, B95 de % 0,85 , B90 da % 0,90 ve B85 de %1,15 olmuştur.

Genel olarak CO emisyonu %100 birincil yakıt kullanımında biyodizel yüzdesinin artışıyla genel olarak artmış, aynı şekilde Etanol RCCI yüzdesinin artışı ile emisyon değerleri artmıştır. Yük artışıyla emisyon değerleri azalmıştır. Ancak, tüm çalışma koşullarında ve RCCI uygulamasında sınır değerlerin altında ve düşük seviyelerde gerçekleşmiştir. Ayrıca bekleneneği gibi dizel motorlar genel olarak fazla hava ile çalıştıklarından CO emisyonları düşük olur.

Egzoz emisyonu değerlerinin farklı çalışma koşulları için yüzdelik olarak değişimi Şekil 3 7a'da gösterilmektedir. Bu sonuçlara göre CO miktarları, B90+CEE10'da %0.96 olan en yüksek değerlerde bulundu. B85+DEE15'te ise CO değerleri en düşük olarak görüldü. Yine B85+DEE15'te NO_x (Şekil 3 7b) ve %CO miktarları (Şekil 3 7a) en düşük değerlere sahipti.



Şekil 3.7.a. Egzoz emisyonu değerlerinin farklı çalışma koşulları için yüzdelik olarak değişimi



Şekil 3.7.b. Egzoz emisyonu değerlerinin farklı çalışma koşulları için PPM olarak değişimi

Tablo 3.1. Egzoz emisyonu değerlerinin farklı çalışma koşulları için değişimi

Yük/Yakıt	ULSD	B100	B95+DEE5	B90+DEE10	B85+DEE15
CO (%)	0,68	0,78	0,85	0,96	1,15
NO _x (PPM)	88	64	42	33	27
HC(PPM)	64	55	66	78	92
CO ₂ (%)	7,4	7,6	6,6	6,2	4,8

Yüksek sıcaklık bölgelerinde lokal veya genel oksijen eksiklikleri CO oluşumunun ana sebeplerindendir. Bunun yanı sıra yüksek sıcaklıklarda CO daha hızlı oksitleme işlemi ile sonuçlanabilir fakat tutuşma üst ölü nokta yakınında olursa CO oluşumu düşüktür. CO emisyonları dizel motorlarda genellikle düşüktür. Bu nedenle, tüm test yakıtlarında konvansiyonel dizel ve RCCI modlarında CO emisyonları oldukça düşüktür. RCCI modunda CO emisyonu artsa da oldukça düşük olduğu görülmektedir. Bu sonuçların nedeni tam olmayan yanma ve aşırı fakir karışımdır ve ısı kaybı azalarak soğutma etkisiyle CO-CO₂ oksidasyonu azalır (Narwal, 2013).

3.4.2.Hidrokarbon

7,2 kW yük uygulamasında HC emisyonu %100 birincil yakıt kullanımında emisyon miktarını arttırmış, saf dizelde 111 (ppm), B10 da 170 (ppm) , B20 de 119 (ppm) ve B50 de 121 (ppm) olmuştur. % 40 Etanol RCCI uygulamasında genel olarak artışlar olmuş, saf dizelde 429 (ppm), B10 da 590 (ppm), B20 de 600 (ppm) ve B50 de 398 (ppm) olmuştur. % 60 Etanol RCCI uygulamasında genel olarak artışlar olmuş, saf dizelde 588 (ppm) , B10 da 684 (ppm) , B20 de 597 (ppm) ve B50 de 612 (ppm) olmuştur.

Genel değerlendirmede HC emisyonu %100 birincil yakıt kullanımında biyodizel yüzdesinin artışıyla genel olarak artmış, aynı şekilde RCCI yüzde artışı emisyonu arttırmıştır. Yükün artışıyla emisyon değerleri düşmektedir. B50 kullanımında emisyonunda genel düşme eğilimi vardır.

RCCI yanmanın tek yakıt uygulamasından daha yüksek HC emisyonu üretmesinin nedeni, etanol RCCI de fakir karışım ve dolayısıyla düşük sıcaklıklı yanmanın eksik yanmaya yol açmasıdır. RCCI yanma sırasında yanma doğrudan yanma odasına yüksek reaktivite yakıt enjeksiyonu ile başlatılır. Düşük reaktivite etanol artışı, bir ateşleme kaynağı olan yüksek reaktivite yakıtta bir azalmaya neden olmuştur. RCCI yanmada

tutuşma gecikmesinin uzaması yeterli karışım oluşumu süresi sağlar ve fakir karışım oluşarak yanma odasının uzak kısımlarında eksik yanma sonucu ortaya çıkar. Öte yandan, etanolün buharlaşma gizil ısısı yüksektir, bölgesel olarak düşük silindir sıcaklığına neden olur ve özellikle silindir duvarlarına yakın girintilerde oluşan sönme bölgelerine neden olduğundan yanmamış HC emisyonlarına neden olur. Bunun yanı sıra, etanol ve biyodizel karışımları yüksek oksijen içeriğine sahiptir ve fakir karışım oluşarak HC oluşumuna neden olur.

Lu ve ark. (2008), yaptıkları çalışmada etanol ve biyodizel çift yakıt kullanımında etanol manifold enjeksiyonunda HC emisyonlarının yüksek olduğu belirlenmiş, yanma hızının artışı ve ortalama gaz sıcaklığındaki artışın azaltmaya yardımcı olacağı bildirilmiştir.

Çınar ve ark. (2010), yaptıkları çalışmada ise tek silindirli dizel motorunda ön karışimli di-etil eter (DEE) yakıtı sabit motor hızında kullanılmış, ön karışimli tek aşamalı tutuşma gerçekleştiği, DEE artışının düzensiz yanma aşamasında maksimum silindir basıncı ve ısı yayılım oranını yükselttiği, NO_x ve is emisyonlarının eş zamanlı olarak %19,4 ve %76 oranlarında azaldığı, CO ve HC emisyonları artış gösterdiği bildirilmiştir.

Akcan (2013), yaptığı çalışmada dizel motorda MTBE HCCI uygulamasında tam yük ve yarım yük çalışma şartlarında ön karışimli MTBE yakıtındaki artışa bağlı olarak HC emisyonlarının arttığı, karışımın fakir olmasının ve/veya geç art aşamasında CO emisyonları arttırdığı bildirilmiştir (Narwal, 2013)

3.4.3.Azotoksit

7,2 kW yük uygulamasında azotoksit (NO_x) emisyonu %100 birincil yakıt kullanımında biyodizel kullanımı emisyon miktarını düşürmüştür, saf dizelde 468 (ppm), B10 da 435 (ppm) , B20 de 456 (ppm) ve B50 de 460 (ppm) olmuştur. % 35 Etanol RCCI uygulamasında genel olarak düşüşler olmuş, saf dizelde 311 (ppm) , B10 da 247 (ppm), B20 de 244 (ppm) ve B50 de 347 (ppm) olmuştur. % 55 Etanol RCCI uygulamasında genel olarak düşüşler olmuş, saf dizelde 216 (ppm) , B10 da 211 (ppm) , B20 de 177 (ppm) ve B50 de 285 (ppm) olmuştur.

Genel olarak NO_x emisyonu %100 birincil yakıt kullanımında biyodizel yüzdesinin artışıyla genel olarak düşmüş, B50 de tekrar artma eğilimi gözlenmiş, RCCI yüzde artışı emisyonu düşürmüştür. Yükün artışıyla emisyon değerleri artmaktadır.

Dizel motorda NO_x oluşumu için iki ana neden olarak yüksek silindir içi sıcaklık ve bu sıcaklıkta uzun süre kalınmasıdır. RCCI modlarında etanol miktarının artışı ile NO_x

önemli azalmalar olması, etanolün soğutma etkisine bağlı olduğu düşünülmektedir. Yüksek buharlaşma gizli ısısı nedeniyle etanol ön karışımı silindir sıcaklığını azaltır. Biyodizel yakıtların tek yakıt operasyonunda biyodizelin yüksek alev sıcaklığı ve oksijen içeriği nedeniyle NO_x emisyonlarını yükselmektedir.

Lu ve ark., 2008 yaptıkları çalışmada etanol ve biyodizel çift yakıt kullanımında etanol port enjeksiyonunda NO_x emisyonlarının azaldığı, etanolün yüksek buharlaştırma gizli ısısının nedeniyle sıkıştırma sonu sıcaklığının düşüşü ve daha homojen karışımın lokal yüksek sıcaklık bölgelerini azaltmasına bağlı olduğu bildirmiştir.

Han ve ark. (2013), yaptıkları çalışmada ise dizel motorda etanol kullanımı ile EGR kullanımı olmaksızın sağlanan yanma kontrolü ile düşük sıcaklıklı yanma elde edildiği, uzun tutuşma gecikmesi ve gelişmiş bir dolgu homojenliği ile NO_x ve is emisyonlarının azaldığı ve bu uygulamanın özellikle yüksek yüklerde kullanıma uygun olduğu bildirmiştir.

He ve ark. (2004), yaptıkları çalışmada ise, iki silindirli bir dizel motorda etanol-hava karışımının egzoz emisyonları incelenmiş, yanma başlangıcının geciktiği ve toplam yanma süresinin kısaldığı, etanol miktarının artması ile NO_x emisyonlarının azaldığı, tüm çalışma koşullarında ön karışimli etanol ile HC ve CO emisyonlarında da artış meydana geldiği bildirmiştir(Narwal, 2013).

3.4.4.Karbondioksit

7,2 kW yük uygulamasında CO₂ emisyonu %100 birincil yakıt kullanımında biyodizel kullanımı emisyon miktarını arttırmıştır, saf dizelde % 4,7, B10, B20 ve B50 de % 5 olmuştur. % 35 Etanol RCCI uygulamasında genel olarak düşüşler olmuş, saf dizelde % 4,7, B10 da % 4,5 ve B20 de % 4,7 ve B50 de % 4,7 olmuştur. % 55 Etanol RCCI uygulamasında genel olarak düşüşler olmuş, saf dizelde % 4,2, B10 da % 4,3, B20 de % 4,4 ve B50 de % 4,9 olmuştur.

Genel değerlendirmede CO₂ emisyonu %100 birincil yakıt kullanımında biyodizel yüzdesinin artışıyla genel olarak arttırmıştır, RCCI yüzde artışı emisyonu düşürmüştür. Yükün artışıyla emisyon değerleri arttırmaktadır.

RCCI modunda CO emisyonu artışı görülmektedir. Nedeni tam olmayan yanma ve aşırı fakir karışımdır ve ısı kaybı soğutma etkisiyle CO-CO₂ oksidasyonu azalır. Bu nedenle CO₂ emisyonu azalır.

Canda (2012), yaptığı çalışmada dizel yakıtı – metanol karışım yakıtlarından elde edilen CO₂ emisyonu değerlerinin dizel yakıtından daha düşük olmasının nedenin

metanolun dizel yakıtına oranla daha az C atomu içermesi olduğu, karışım yakıtlarının C atomu oranı düştüğü için yanma sonu açığa çıkan CO₂ emisyonun azaldığı bildirmiştir (Narwal, 2013).

3.4.5. Oksijen

7,2 kW yük uygulamasında O₂ emisyonu %100 birincil yakıt kullanımında biyodizel kullanımı emisyon miktarını küçük oranda azaltmıştır, saf dizelde % 13, B10 da % 12,9, B20 de % 12,7 ve B50 de % 13 olmuştur. % 35 Etanol RCCI uygulamasında genel olarak artış olmuş, saf dizel, B20 ve B50 de % 13,3 olmuştur. % 55 Etanol RCCI uygulamasında genel olarak artış olmuş, saf dizelde % 13,4, B10 da % 13,6, B20 de % 13,4 ve B50 de % 13,4 olmuştur.

Genel olarak O₂ emisyonu %100 birincil yakıt kullanımında biyodizel yüzdesinin artışıyla genel olarak küçük yüzdelerde azalmıştır, RCCI yüzde artışı emisyonunu artırma eğilimindedir. Yükün artışıyla emisyon değerleri azalmaktadır

RCCI yanmada tek yakıt yanmadan daha yüksek O₂ emisyon üretilmesinin, yüksek O₂ içeriğine sahip etanolün ön karışımına bağlı olduğu kabul edilir (Narwal, 2013).

3.5. Performans Parametreleri

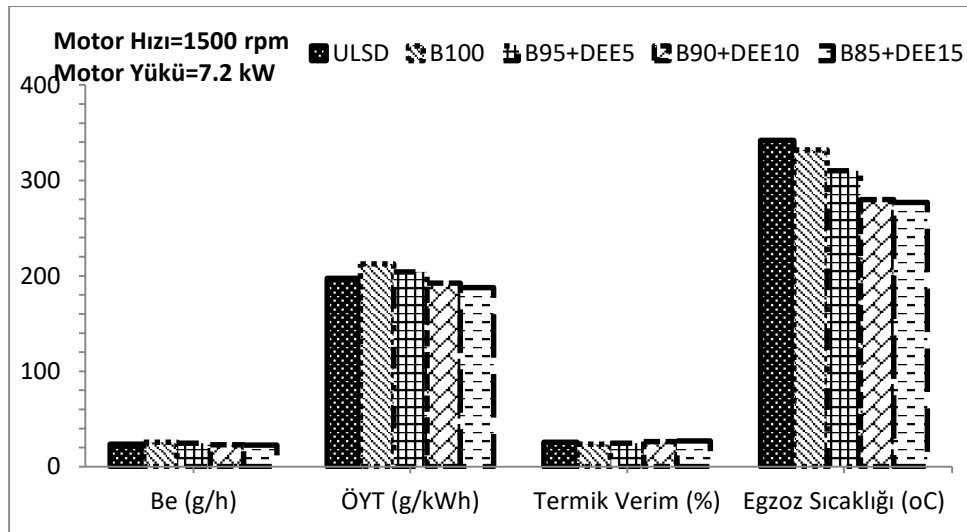
Farklı krank açılarına sahip MFC, BSFC, BTE ve BSEC performans göstergelerinin varyasyonları Şekil de gösterilmektedir.

Şekle baktığımızda sıkıştırma oranına bağlı olarak MFC, BSFC ve BSEC değerlerinin düştüğü, BTE değerlerinin ise sıkıştırma oranına bağlı olarak arttığı görülmektedir. Test yakıtları karşılaştırıldığında tüm sıkıştırma oranları için en düşük kütle yakıt tüketim değerlerinin ULSD' de, en yüksek değerlerin ise B100 yakıtı için elde edildiği görülmektedir. Ancak biyodizel/DEE RCCI modları için kütle yakıt tüketim değerlerinin düştüğü ve tüm sıkıştırma oranlarının ULSD değerlerine yaklaştığı görülmektedir. Yine BSFC değerlerine baktığımızda en düşük BSFC değerlerinin ULSD için, en yüksek değerlerin ise B100 için alındığı benzer bir durumla karşılaşırız. Bu, biyodizelin daha düşük ısı değerine bağlanabilir. DEE ile RCCI çalışması sayesinde, daha düşük yanma süresi nedeniyle düşük kalorifik değerlerin olumsuz etkisinin belirli miktarlarda telafi edildiği olduğu görülmektedir. Isı kayıpları ve nihayetinde artan motor

verimliliği bu çalışmanın en önemli olumlu sonuçlarından biri olarak, RCCI stratejisi BTE değerlerini artırabilir.

Şekil 3.2' ye baktığımızda tüm test yakıtları için artan sıkıştırma oranı ile BTE değerlerinin arttığı görülmektedir. Test yakıtları için farklı RCCI modları karşılaştırıldığında, BTE değerlerinin oldukça yüksek olduğu ve yüksek DEE' li çalışma koşullarında dizel yakıtı geçtiği görülmektedir. Bu nedenle, tüm CR değerleri için B90/DEE10 ve B85/DEE15 RCCI çalışma koşulları için en yüksek termal verim değerleri elde edilmiştir. Bu durum KEİ değerlerine de yansımaktadır. Biyodizel/DEE RCCI modları için KEİ değerlerinin arttığı açıkça görülmektedir. Bu olumlu durumlar hiç şüphesiz RCCI çalışma modları sayesinde olmaktadır. RCCI çalışmasında, yanma başladıktan sonra alev hızının artması ve dolayısıyla daralmış yanma süresi sayesinde yanmış gazlardan yanmamış yüke olan ısı transfer miktarı azalmaktadır. Azalan ısı kayıpları ortalama efektif basıncı artırır ve dolayısıyla iş miktarı da artar. Özellikle RCCI uygulamasında alev hızının artması, tama yakın yanma ve ısı transferinin azalması gibi sebepler verimi arttırmıştır. Ayrıca RCCI yanmasında silindir duvarı ve piston kafası yüzeylerinin yakınında bulunan yüksek sıcaklık bölgelerinin ortadan kaldırılması da önemli bir faktördür. Bu, ısı transfer kayıplarını azaltır ve genişleme işi artar.

İkinci bir neden, RCCI uygulamasının yanmanın başlangıcını ve sonunu kontrol etmeyi kolaylaştırmasıdır. Yanma kontrolü ile yanma zamanlaması ve süresi optimize edilmiştir. Sıkıştırma işi azalır ve genişletme işi artar, bu da motorun verimliliğini ve genel performansını artırır.



Şekil 3.8. Motor performans parametrelerinin farklı çalışma koşulları için değişimi

Tablo 3.2. Motor performans parametrelerinin farklı çalışma koşulları için değişimi

Yük/Yakıt	ULSD	B100	B95+DEE5	B90+DEE10	B85+DEE15
Be (g/h)	23,7	25,5	24,5	23,1	22,5
ÖYT (g/kWh)	197,5	212,5	204,2	192,5	187,5
Termik Verim (%)	25,55	23,75	24,72	26,22	26,92
Egzoz Sıcaklığı (°C)	342	332	310	280	277

4. SONUÇ ve ÖNERİLER

Bu çalışmada, tek silindirli bir dizel motorda yakıt ve motor yük oranı değiştirilerek, farklı sıkıştırma oranlarının, farklı oranlarda yakıt kullanımında motorun performans, yanma ve egzoz emisyonları üzerindeki etkiler incelenerek yorumlanmıştır. Kullanılan yakıt oranları aşağıdaki gibidir.

- 1) %100 Dizel yakıtı
- 2) %100 Biyodizel
- 3) %95 Biyodizel & %5 Dietileter
- 4) %90 Biyodizel & %10 Dietileter
- 5) %85 Biyodizel & %15 Dietileter

En yüksek silindir basınç değerinde RCCI stratejisine göre oldukça verimlidir. Yanma ve performans parametrelerinin iyileştiği görülmektedir. Farklı sıkıştırma oranlarında vuruntu değerlerinin arttığı görülmektedir. Fakat bu artan değerlere rağmen yanmada herhangi bir sorun teşkil etmemiştir.

Biyodizel yakıtın ısı yayılma hızı dizel yakıtı göre daha yüksek olduğu görülmekte ancak yanma geç oluşmaktadır. Bu gecikme, herhangi bir olumsuzluğa sebebiyet vermemiştir. Sadece farklı sıkıştırma oranlarında yani sıkıştırma oranının azalmasıyla motor performansının etkilendiği gözlemlenmiştir. Birim krank açısı başına tüketilen yakıtın arttığı ve bu sebepten dolayı performansın düştüğü kanaatine varılmıştır.

Emisyon değerlerine baktığımızda CO (Karbonmonoksit) değerleri Biyodizel kullanımı ile artmış fakat yük artışıyla azalma göstermiştir. Bunun sebebi tam olmayan yanma ve fakir karışımdır. Bu fakir karışım ve düşük sıcaklıktaki yanma HC (Hidrokarbon) emisyonlarının artışına sebep olmuştur. İlk başlangıçtaki dizel yakıtı göre biyodizel yakıtta NO_x değerlerinde azalma görülmüş olup yük artışlarında ise emisyon değerlerinde tam ters yönde artış gözlemlenmiştir. Bu artışın en büyük sebebi ise ortam sıcaklığı ve oksijen içeriğinden kaynaklanmaktadır. Biyodizel kullanımı artışıyla CO₂ emisyon değerlerinde artış gözlemlenmiştir. Fakir karışım ve ısı kaybı etkisiyle CO – CO₂ oksidasyonu azalır. Bu nedenle CO₂ emisyonunda azalma görülür. O₂ (oksijen) oranı biyodizel kullanımı ile azda olsa azalma gözlemlenmiştir. RCCI artışında emisyon

değerlerinde artma eğilimine geçmiştir fakat motor yük artışı oluştuğunda ise emisyon değerlerinde azalma gözlemlenmiştir.

DEE ile RCCI çalışması sayesinde, daha düşük yanma süresi nedeniyle düşük kalorifik değerlerin olumsuz etkisinin belirli miktarlarda telafi edildiği olduğu görülmektedir. Isı kayıpları ve nihayetinde artan motor verimliliği bu çalışmanın en önemli olumlu sonuçlarından biri olarak gösterilebilir. Özellikle RCCI uygulamasında alev hızının artması, tama yakın yanma ve ısı transferinin azalması gibi sebepler verimi arttırmıştır. Başka bir sonuç da RCCI uygulamasının yanmanın başlangıcını ve sonunu kontrol etmeyi kolaylaştırmasıdır. Yanma kontrolü ile yanma zamanlaması ve süresi optimize edilmiştir. Sıkıştırma işi azalır ve genişletme işi artar, bu da motorun verimliliğini ve genel performansını artırır.

Genel olarak bakıldığında Biyodizel ve LPG kullanımında motorun yanma verimi arttığından özellikle düşük sıkıştırma oranlarında özgül yakıt tüketimi azalmış yani motor performansı artış göstermiştir ve emisyon değerlerinde de azalma gözlemlenmiştir. Buradan anlaşılabacağı üzere nispeten Biyodizel ve LPG kullanımı yanma verimini iyileştirme açısından ve emisyon değerleri açısından önerilmektedir.

KAYNAKÇA

- (PDF) Türkiye Ekonomisinde Enerji Tüketimi ile Ekonomik Büyüme İlişkisi (1972-2011).(n.d.).Retrieved March7, 2023.
- [PDF] Hayvansal ve Bitkisel Yağlardan Elde Edilen Biyodizelin Dizel Yakıtı ile Karşılaştırılması - Free Download PDF. (n.d.). Retrieved March 7, 2023.
- Ahmadi, M. H., Sadaghiani, M. S., Pourfayaz, F., Ghazvini, M., Mahian, O., Mehrpooya, M. & Wongwises, S. (2018). Energy and exergy analyses of a solid oxide fuel cell-gas turbine-organic rankine cycle power plant with liquefied natural gas as heat sink. *Entropy*, 20(7).
- Akgün, G., Bayindir, H., Hüseyin AYDIN, ve, Düz, Z., Üniversitesi, D. & Mimarlık Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümü, M. (n.d.). HAYVANSAL YALARDAN BODZEL ÜRETİM VE TEKNİK DEĞERLERİN BELİRLENMESİ ÜZERİNE BİR ÇALIŞMA.
- Akif Ersoy Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi Özel Sayı, M., Uyumaz, A., Boz, F., Yılmaz, E., Solmaz, H., Polat, S., Akif Ersoy Üniversitesi, M., Bilimler Meslek Yüksekokulu, T., Üniversitesi, G., Fakültesi, T., Üniversitesi, H. & Sorumlu Yazar, Ç. (2017). Taşıt Egzoz Emisyonlarını Azaltma Yöntemlerindeki Gelişmeler a. In *The Journal of Graduate School of Natural and Applied Sciences of Mehmet Akif Ersoy University Special Issue* 1(1).
- AKTAŞ ve Oğuzhan DOĞAN, A., Eğitimi Bölümü, M., Eğitim Fakültesi, T. & Üniversitesi, K. (2010). ÇİFT YAKITLI BİR DİZEL MOTORDA LPG YÜZDESİNİN PERFORMANS VE EGZOZ EMİSYONLARINA ETKİSİ EFFECTS OF LPG PERCENTAGE TO PERFORMANCE AND EXHAUST EMISSIONS IN A DUAL FUEL ENGINE. In *Fak. Der. J. Fac. Eng. Arch. Gazi Univ. Cilt*, 25(1).
- Allen, D. T. (2014). Atmospheric emissions and air quality impacts from natural gas production and use. In *Annual Review of Chemical and Biomolecular Engineering*, 5, 55–75.
- Balcombe, P., Heggo, D. A. & Harrison, M. (2022). Total Methane and CO₂ Emissions from Liquefied Natural Gas Carrier Ships: The First Primary Measurements. *Environmental Science and Technology*, 56(13), 9632–9640.
- Chapman, L. (2007). Transport and climate change: a review. *Journal of Transport Geography*, 15(5), 354–367.
- CSO. (2019). *Energy statistics 2019 (twenty sixth issue)*. 1–123.
- DeMarini, D. M., Mutlu, E., Warren, S. H., King, C., Gilmour, M. I. & Linak, W. P. (2019). Mutagenicity emission factors of canola oil and waste vegetable oil biodiesel: Comparison to soy biodiesel. *Mutation Research - Genetic Toxicology and Environmental Mutagenesis*, 846.
- Díaz-Pérez, M. A. & Serrano-Ruiz, J. C. (2020). Catalytic production of jet fuels from biomass. In *Molecules* 25(4).
- Elkafas, A. G., Khalil, M., Shouman, M. R. & Elgohary, M. M. (2021). Environmental protection and energy efficiency improvement by using natural gas fuel in maritime transportation. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(43), 60585–60596.
- Energy Explained - U.S. Energy Information Administration (EIA)*. (n.d.). Retrieved March 7, 2023.

- Eswaran, N., Parameswaran, S. & Johnson, T. S. (2021). Biofuels and Sustainability. In *Methods in Molecular Biology*, 2290, 317–342.
- FIRAT, M., ALTUN, Ş., OKCU, M., VAROL, Y. & ŞENOCAK, M. Ş. (2022). Experimental study on reduction of pollutant emissions in reactivity controlled compression ignition (RCCI) engine fueled with diesel/gasoline fuels. *International Journal of Automotive Engineering and Technologies*, 11(2), 63–72.
- Grandin, K., Jagers, P. & Kullander, S. (2010). Nuclear energy. *Ambio*, 39(SPEC. 1), 26–
- Hammerschlag, R. (2006). Ethanol's Energy Return on Investment: A Survey of the Literature 1990–Present. *Environmental Science & Technology*, 40(6), 1744–1750.
- HAŞİMOĞLU, C., İÇİNGÜR, Y. & ÖĞÜT, H. (2002). Dizel motorlarında egzoz gazları resirkülasyonunun (EGR) motor performansı ve egzoz emisyonlarına etkisinin deneysel analizi. *Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences*, 26(2), 127–135.
- Hassan, N. M., Mansou, N. A., Salama, S. & Seoud, M. S. (2019). Assessment of radiological hazards of using petroleum raw materials and their waste. *Radiation Protection Dosimetry*, 185(4), 494–506.
- Heidari-Maleni, A., Mesri-Gundoshmian, T., Jahanbakhshi, A., Karimi, B. & Ghobadian, B. (2021). Novel environmentally friendly fuel: The effect of adding graphene quantum dot (GQD) nanoparticles with ethanol-biodiesel blends on the performance and emission characteristics of a diesel engine. *NanoImpact*, 21.
- Horvath, A. & Rachlew, E. (2016). Nuclear power in the 21st century: Challenges and possibilities. *Ambio*, 45(1), 38–49.
- Hu, G., Li, J. & Zeng, G. (2013). Recent development in the treatment of oily sludge from petroleum industry: A review. *Journal of Hazardous Materials*, 261, 470–490.
- Huang, H., Li, Z., Teng, W., Zhou, C., Huang, R., Liu, H. & Pan, M. (2019). Influence of n-butanol-diesel-PODE3-4 fuels coupled pilot injection strategy on combustion and emission characteristics of diesel engine. *Fuel*, 236, 313–324.
- İle Ateşlemeli Bir Motorda, B. (2016). *KIRIKKALE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ MAKİNA ANABİLİM DALI YÜKSEK LİSANS TEZİ*. Kırıkkale Üniversitesi.
- Kaleli, H., Yıldız, ;, Üniversitesi, T., Fakültesi, M. M. & Bölümü, M. M. (n.d.). *İÇTEN YANMALI MOTORLARDA AŞINMA, YAĞLAMA VE SOĞUTMA (Lisans dersi notları)*.
- Karagöl, E. T. & Kaya, S. (2016). *LNG 'NİN DÜNYA ENERJİ TİCARETİNDEKİ YERİ*.
- Kokjohn, S. L., Hanson, R. M., Splitter, D. A. & Reitz, R. D. (2011). Fuel reactivity controlled compression ignition (RCCI): A pathway to controlled high-efficiency clean combustion. *International Journal of Engine Research*, 12(3), 209–226.
- Li, J., Yang, W. & Zhou, D. (2017). Review on the management of RCCI engines. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 69, 65–79.
- Liu, Y., Cruz-Morales, P., Zargar, A., Belcher, M. S., Pang, B., Englund, E., Dan, Q., Yin, K. & Keasling, J. D. (2021). Biofuels for a sustainable future. In *Cell* 184(6) 1636–1647.
- Lozano, J. A., Oliver, N., Pérez-Cruz, F., Kramer, S., Read, J., Dong, Y., Kourtellis, N. & Hammer, B. (2021). Preface. In *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)* 12976, v–vi
- Ma, Y., Gao, Z., Wang, Q. & Liu, Y. (2018). Biodiesels from microbial oils: Opportunity and challenges. In *Bioresource Technology* 263, 631–641
- Mackey, B. & Lindenmayer, D. (2014). Fossil fuels' future. In *Science* 345 (6198), 739–740). American Association for the Advancement of Science.

- Martin, M. A. (2010). First generation biofuels compete. In *New Biotechnology* 27(5), 596–608).
- Moran, M. E. (2010). The light bulb, cystoscopy, and Thomas Alva Edison. *Journal of Endourology*, 24(9), 1395–1397.
- Motor Termodinamiği - Ali Sürmen - M.İhsan Karamangil - Rıdvan Arslan.* (n.d.). Retrieved March 7, 2023.
- Mutluer, M. (1990). Gelişimi, yapısı ve sorunlarıyla Türkiye’de enerji sektörü. In *Ege Coğrafya Dergisi* 5, (1).
- Narayan Thorat, B. & Kumar Sonwani, R. (2022). Current technologies and future perspectives for the treatment of complex petroleum refinery wastewater: A review. In *Bioresource Technology* (Vol. 355).
- Narwal, S. K. & Gupta, R. (2013). Biodiesel production by transesterification using immobilized lipase. In *Biotechnology Letters*, 35(4) 479–490.
- Násner, A. M. L., Lora, E. E. S., Palacio, J. C. E., Rocha, M. H., Restrepo, J. C., Venturini, O. J. & Ratner, A. (2017). Refuse Derived Fuel (RDF) production and gasification in a pilot plant integrated with an Otto cycle ICE through Aspen plus™ modelling: Thermodynamic and economic viability. In *Waste Management* 69, 187–201. Elsevier Ltd.
- Nazemi, M. & Shahbakhti, M. (2016). Modeling and analysis of fuel injection parameters for combustion and performance of an RCCI engine. *Applied Energy*, 165, 135–150.
- Oo, Y. M., Thawornprasert, J., Intaprom, N., Rodniem, K. & Somnuk, K. (2022). Diesel-Biodiesel-Water Fuel Nanoemulsions for Direct Injection and Indirect Injection Diesel Engines: Performance and Emission Characteristics. *ACS Omega*, 7(39), 34951–34965.
- Opat, R., Ra, Y., Gonzalez D., M. A., Krieger, R., Reitz, R. D., Foster, D. E., Durrett, R. P. & Siewert, R. M. (2007, April 16). Investigation of mixing and temperature effects on HC/CO emissions for highly dilute low temperature combustion in a light duty diesel engine. *SAE Technical Papers*.
- OPEC : Annual Statistical Bulletin.* (n.d.). Retrieved March 7, 2023, from
- Reitz, R. D. & Duraisamy, G. (2015). Review of high efficiency and clean reactivity controlled compression ignition (RCCI) combustion in internal combustion engines. In *Progress in Energy and Combustion Science* 46, 12–71.
- Sajedi, N. A., Ferasat, M., Mirzakhani, M. & Boojar, M. M. A. (2012). Impact of water deficit stress on biochemical characteristics of safflower cultivars. *Physiology and Molecular Biology of Plants*, 18(4), 323–329.
- Shanmugam, R., Murugesan, P., Guye, G. G. & Duraisamy, B. (2021). Effect of additives on the stability of ethanol-diesel blends for IC engine application. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(10), 12153–12167.
- ŞİMŞEK, D. & Çolak, N. Y. (2019). Biyodizel/Propanol Yakıt Karışımlarının Dizel Motor Emisyonlarına Etkisinin İncelenmesi. *El-Cezeri Fen ve Mühendislik Dergisi*, 6(1), 166–174.
- Şimşek, S., Özdayan, B., Öztürk, E., Şimşek, H., Aydın Üniversitesi, İ., BİL Meslek Yüksekokulu, A., Teknolojisi Bölümü, O., Namık Kemal Üniversitesi, T. & Bilimler Meslek Yüksekokulu, T. (n.d.). *Alternatif Yakıt Olarak Araçlarda Biyoetanolin Kullanılması*.
- Singh, A. P., Kumar, V. & Agarwal, A. K. (2020). Evaluation of comparative engine combustion, performance and emission characteristics of low temperature combustion (PCCI and RCCI) modes. *Applied Energy*, 278.
- Soudagar, M. E. M., Banapurmath, N. R., Afzal, A., Hossain, N., Abbas, M. M., Haniffa,

- M. A. C. M., Naik, B., Ahmed, W., Nizamuddin, S. & Mubarak, N. M. (2020). Study of diesel engine characteristics by adding nanosized zinc oxide and diethyl ether additives in Mahua biodiesel–diesel fuel blend. *Scientific Reports*, 10(1).
- Statistical Review of World Energy | Energy economics | Home. (n.d.). Retrieved March 7, 2023
- Tamilvanan, A., Balamurugan, K., Ashok, B., Selvakumar, P., Dhamotharan, S., Bharathiraja, M. & Karthickeyan, V. (2021). Effect of diethyl ether and ethanol as an oxygenated additive on Calophyllum inophyllum biodiesel in CI engine. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(26), 33880–33898.
- Tarabet, L., Loubar, K., Lounici, M. S., Hanchi, S. & Tazerout, M. (2012). Eucalyptus biodiesel as an alternative to diesel fuel: Preparation and tests on di diesel engine. *Journal of Biomedicine and Biotechnology*, 2012.
- Tesfa, B., Gu, F., Mishra, R. & Ball, A. D. (2013). LHV predication models and LHV effect on the performance of CI engine running with biodiesel blends. *Energy Conversion and Management*, 71, 217–226.
- Thangaraja, J. & Srinivasan, V. (2019). Techno-economic assessment of coconut biodiesel as a potential alternative fuel for compression ignition engines. *Environmental Science and Pollution Research*, 26(9), 8650–8664.
- TÜRKİYE PETROLLERİ MAYIS 2018. (2018).
- Türkiye Taşkömürü Kurumu. (n.d.). Retrieved March 7, 2023
- U.S. Energy Information Administration - EIA - Independent Statistics and Analysis. (n.d.). Retrieved March 7, 2023
- Verma, T. N., Rajak, U., Dasore, A., Afzal, A., Manokar, A. M., Aabid, A. & Baig, M. (2021). Experimental and empirical investigation of a CI engine fuelled with blends of diesel and roselle biodiesel. *Scientific Reports*, 11(1), 1–23.
- Vijayakumar, C., Ramesh, M., Murugesan, A., Panneerselvam, N., Subramaniam, D. & Bharathiraja, M. (2016). Biodiesel from plant seed oils as an alternate fuel for compression ignition engines—a review. *Environmental Science and Pollution Research*, 23(24), 24711–24730.
- Wu, J. & Shang, J. (2022). Environmental and energy implications of coal-based alternative vehicle fuel pathway from the life cycle perspective. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(37), 56727–56738.
- Yao, Y. C., Tsai, J. H. & Chiang, H. L. (2009). Effects of ethanol-blended gasoline on air pollutant emissions from motorcycle. *Science of the Total Environment*, 407(19), 5257–5262.
- Yorulmaz, Y., Üniversitesi, M., Fakültesi, F.-E. & Bölümü, T. (1998). *TÜRKİYE’DE KÖMÜRÜN KEŞFİ VE KÖMÜR İŞLETME İMTİYAZLARI (1829-1937) DISCOVERY OF COAL AND CONCESSIONS OF COAL MINES IN TURKEY(1829-1937)*.
- Živković, S. & Veljković, M. (2018). Environmental impacts the of production and use of biodiesel. In *Environmental Science and Pollution Research* 25(1), 191–199.
- Zwęgliński, T. (2022). Conventional Event Tree Analysis on Emergency Release of Liquefied Natural Gas. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(5).