

## Reaktivite Kontrollü Sıkıştırma Ateşlemeli Bir Motorda Motor Devrinin Yanma ve Emisyon Karakteristikleri Üzerindeki Etkisinin Araştırılması

Mutlu OKCU<sup>1\*</sup>, Müjdat FIRAT<sup>2</sup>, Yasin VAROL<sup>3</sup>, Şehmus ALTUN<sup>4</sup>, Okan ÇELİK<sup>5</sup>

<sup>1</sup> Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Ardahan Üniversitesi, Ardahan, Türkiye

<sup>2</sup> Otomotiv Mühendisliği Bölümü, Teknoloji Fakültesi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye

<sup>3</sup> Otomotiv Mühendisliği Bölümü, Teknoloji Fakültesi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye

<sup>4</sup> Makine Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Batman Üniversitesi, Batman, Türkiye

<sup>5</sup> Motorlu Araçlar ve Ulaştırma Tek. Bölümü, Teknik Bilimler MYO, Gaziantep Üniversitesi, Gaziantep, Türkiye

\*<sup>1</sup> mutluokcu@gmail.com, <sup>2</sup> mujdatfirat@gmail.com, <sup>3</sup> yvarol@gmail.com, <sup>4</sup> altun.sehmus@gmail.com,

<sup>5</sup> mr.okancelik@gmail.com

(Geliş/Received: 09/11/2021;

Kabul/Accepted: 03/02/2022)

**Öz:** Yapılan çalışmada, Reaktivite kontrollü Sıkıştırma Ateşlemeli (RCCI) stratejiler altında çalışacak şekilde modifiye edilmiş tek silindirli bir dizel motorda, biyodizel/petrol bazlı dizel karışımı ve benzin kullanımının, yanma ve egzoz emisyon özelliklerine etkisi deneysel olarak araştırılmıştır. Çalışmada dizel ve biyodizel karışımı yüksek reaktiviteli yakıt (HRF), benzin ise düşük reaktiviteli yakıt (LRF) olarak kullanılmıştır. Deneyler 1500, 2000, 2500 ve 3000 d/d olmak üzere dört farklı motor devrinde, %20 yük koşullarında gerçekleştirilmiştir. Çalışmada dizel yakıtının yanında, %20 biyodizel ve %80 petrol kökenli dizel karışımından oluşturulan B20 yakıtı da kullanılmıştır. Dizel ve B20, doğrudan silindire püskürtülürken, benzin emme kanalına enjekte edilmiştir. Elde edilen verilere göre tüm motor devirlerinde RCCI koşullarında LRF kullanımı ile ortalama indike basınç (OİB) değerinin dizel ve B20'ye göre arttığı tespit edilmiştir. Ayrıca, OİB'deki en büyük artış dizelin HRF olarak kullanıldığı deneylerde elde edilmiştir. Öte yandan, LRF'nin kullanılmasıyla NOx emisyonu ve duman opaklığının azaldığı, CO ve HC emisyonunun ise arttığı belirlenmiştir. B20'nin HRF olarak kullanıldığı ve RCCI olmadan yapılan deneylerde HC emisyonu ve duman opaklığı seviyesinin dizele göre daha az olduğu görülmüştür.

**Anahtar kelimeler:** RCCI, B20, Emisyon, Dizel, Benzin.

### Investigation of the Effect of Engine Speed on Combustion and Emission Characteristics in a Reactivity-Controlled Compression Ignition Engine

**Abstract:** In this study, in a single cylinder diesel engine converted to operate in RCCI mode, the effect of using a biodiesel/petroleum-based diesel mixture and gasoline on combustion and emission characteristics was investigated experimentally. Also, diesel and biodiesel have been used as HRF, and gasoline as LRF. The experiments were carried out in four different engine speed as 1500, 2000, 2500 and 3000 rpm, and under at %20 load. In the study, B20 mixture fuel, which consists of 20% biodiesel and 80% petrol-based diesel mixture by volume, has been used. Diesel and B20 have been injected directly into the cylinder while gasoline was injected into the intake port. With the use of LRF under RCCI conditions at all engine speeds, the IMEP value increased compared to diesel and B20, according to the data obtained. In addition, experiments using diesel as HRF generated the greatest increase in IMEP. On the other hand, it has been determined that NOx emission and smoke opacity decreased, while CO and HC emission increased with the use of LRF at all experiments. In experiments with B20 as the HRF and no RCCI, HC emissions and smoke opacity levels were shown to be lower than with diesel.

**Keywords:** RCCI, B20, Emission, Diesel, Gasoline.

## 1. Giriş

Dizel motorlar yüksek verimleri nedeniyle günlük hayatımızda birçok alanda kullanılmaktadırlar. Bu avantajına rağmen dizel motorlardan kaynaklanan NOx ve is emisyonu salınımının yüksek olması, araştırmacıları bu emisyonları azaltmak için yeni yöntemler aramaya itmiştir. Yapılan araştırmalarda NOx ve is emisyonunun silindir içinde çözülmesi gereken bir problem olduğu görülmüştür. Düşük sıcaklıklı yanma konseptleri (LTC) olarak ifade edilen bu yöntemlerin dizel motorlarda temiz ve verimli yanmayı sağlayacağı ve zararlı emisyonları azaltacağı belirtilmiştir. LTC konseptleri yıllar içinde değişim göstermiştir. Günümüzde HCCI (homojen dolgu sıkıştırma ateşleme), PCCI (ön karışım dolgu sıkıştırma ateşleme ve RCCI ( reaktivite kontrollü sıkıştırma ateşleme) olarak tarif edilmektedir. Bu yöntemlerin kullanıldığı çalışmalar incelendiğinde, düşük NOx ve is emisyon seviyelerin elde edildiği belirlenmiştir [1-4]. Yapılan çalışmada bu yöntemlerden biri olan RCCI konseptli

\* Sorumlu yazar: [mutluokcu@gmail.com](mailto:mutluokcu@gmail.com). Yazarların ORCID Numarası: <sup>1</sup>0000-0002-8226-0994, <sup>2</sup>0000-0001-6978-9044, <sup>3</sup>0000-0003-2989-7125, <sup>4</sup>0000-0002-9017-2986, <sup>5</sup>0000-0003-2240-8069

dizel bir motor kullanılmıştır. RCCI konsepti en az iki farklı reaktiviteye sahip yakıtın silindirde dolgu oluşturduğu bir sistem olarak tanımlanmaktadır. RCCI’de kullanılan iki farklı yakıt silindire iki farklı yolla enjekte edilmektedir. HRF olarak ifade edilen yüksek reaktiviteli yakıt (yüksek setanlı yakıt) doğrudan silindire enjekte edilmekte iken, LRF olarak ifade edilen düşük reaktiviteli yakıt (düşük setanlı yakıt) ise emme portuna yerleştirilen bir enjektör vasıtasıyla enjekte edilmektedir. Farklı zamanlarda silindire enjekte edilen bu yakıtların yanması sonucunda çok düşük NO<sub>x</sub> ve is emisyonları ile kabul edilebilir oranlarda basınç artış oranı ve çok yüksek indike verim ile daha geniş bir yük aralığında çalışabilir olduğu görülmüştür [5-7]. Literatürde yapılan incelemelerde son zamanlarda RCCI konseptli motorların kullanıldığı çalışmaların arttığı görülmüştür [ 8, 9 ]. Bu bağlamda, Okcu ve ark. [10], RCCI konseptli dizel bir motorda dizel ve biyodizel yakıtının HRF, IBE’nin de LRF olarak kullanıldığı deneysel bir çalışma yapmışlardır. Yapılan çalışmada değişen motor yükü ve LRF ön karışım oranı etkisinin motor performans ve egzoz emisyonları üzerine olan etkisi incelenmişlerdir. Özellikle yüksek karışım oranlı LRF kullanımında NO<sub>x</sub> ve duman opaklığının önemli oranlarda azaldığı belirtilmiştir. RCCI alanında başka bir çalışmada Nazemi ve Shahbakhti [11] tarafından yapılmıştır. Yapılan çalışmada, RCCI konseptli bir motorda farklı enjeksiyon parametreleri denenmiş ve bunun ısı salınım ve yanma performansına etkisini incelemişlerdir. Çalışmada enjeksiyon parametreleri değiştirilerek CO ve yanmamış hidrokarbon emisyonlarının %23 ile %39 arasında azaldığını ve bu süreçte indike ve yanma veriminin arttığını gözlemişlerdir. Yapılan bazı çalışmalarda enjeksiyon zamanı ve hava fazlalık katsayısının RCCI konseptli motorlarda önemli olduğu vurgulanmıştır [12]. Yapılan araştırmalar neticesinde, giriş portuna ve silindire enjekte edilen yakıtın, ateşleme zamanlaması ve HRR’yi (ısı salınım oranı) başarıyla kontrol ettiği tespit edilmiştir. Bu sayede RCCI konseptli motorun yüksek ısı verime ulaşabildiği, düşük ve orta yükte herhangi bir aftertreatment sistemi olmaksızın emisyon değerlerinde iyileşme sağladığı belirtilmiştir [13].

Dizel motorlarda zararlı emisyonların azaltılması için farklı yanma teknolojilerinin kullanılmasının yanında, alternatif yakıt kullanımının da arttığı görülmüştür. Bu bağlamda, son zamanlarda yapılan çalışmalarda dizel yakıtı yerine alternatif olarak biyodizel kullanımının arttığı belirlenmiştir. Hayvansal ve bitkisel kaynaklı olarak transesterifikasyon yöntemi ile üretilen biyodizellerin genel olarak yüksek oksijen içeriği ve yenilenebilir olmasının dizel alternatif kullanımının artırdığı görülmüştür [14,15]. Kullanılan biyodizellerin %0’dan %100’e kadar farklı karışım oranlarında kullanımının motor performans ve emisyonlara etkisini araştırıldığı belirlenmiştir. Buna karşın biyodizel kullanımının sınırlayan yüksek viskozite ve düşük ısı değer gibi özelliklerinden dolayı genellikle düşük karışım oranlı biyodizellerin, dizel alternatif olarak kullanıldığı ve tüm dünyada büyük oranda B20 ve B35 karışımlarının yaygın olarak kullanıldığı belirlenmiştir [16].

RCCI konseptli motorlarda dizel ve biyodizelin HRF olarak kullanıldığı birçok çalışma olduğu görülmüştür. Bu çalışmalarda RCCI motorlarda temel problemlerden olan CO ve HC emisyonunun yüksek olması durumunu düzeltmek için sıklıkla biyodizel kullanıldığı belirlenmiştir. Yapılan bu çalışmalarda biyodizel kullanımı ile CO ve HC emisyonunda azalmalar olduğu görülmüştür [17-20]. Ayrıca, yine RCCI konseptli motorlarda LRF olarak birbirinden farklı alternatif yakıtlarında da kullanıldığı birçok çalışmanın olduğu ve bu yakıtlar arasında yüksek ısı değere sahip olması sebebiyle sıklıkla benzin kullanıldığı görülmüştür. Yapılan bu çalışmalarda deneysel yöntemlerin yaygın biçimde kullanıldığı görülmüştür. Ayrıca bu çalışmalarda benzin ön karışım oranı değişimi, motor yükü değişimi, benzin enjeksiyon zamanı değişimi gibi parametrelerin çalışıldığı ve bunların RCCI konseptli motorlarda emisyonların azaltılmasına katkı sağladığı vurgulanmıştır [21-23, 31].

Yukarıda bahsedilen tüm veriler göz önüne alındığında, dizel motorlarda NO<sub>x</sub> ve is emisyonunun azaltılması için RCCI konsepti kullanımının etkili olduğu değerlendirilmiştir. Ayrıca, RCCI konseptli motorlarda LRF olarak benzin kullanımının, benzinin yüksek ısı değere sahip olmasından dolayı bu konseptte alternatif yakıt olarak kullanıldığında etkili olduğu belirlenmiştir. Ancak yapılan araştırmalarda RCCI konseptinin CO ve HC emisyonu kontrol etmede bazı eksiklikleri olduğu belirlenmiştir. Bu aşamada LRF olarak özellikle biyodizel kullanımının HC ve CO emisyon oluşumunun azalmada yaygın olarak kullanıldığı ve etkili olduğu tespit edilmiştir. Ek olarak, yapılan RCCI konsepti araştırmalarında motor yükü değişiminin parametre olarak oldukça yağın olarak kullanıldığı, buna karşın motor devir değişimini esas alan çalışmaların yetersiz olduğu görülmüştür. Devir sayısı değişimi, HRF olarak B20 ve dizel ile birlikte LRF olarak benzin kullanımının literatürdeki bu eksikliği gidereceği ve RCCI konseptli çalışmaların gelişimine katkı sağlayacağı değerlendirilmiştir. Bu bağlamda yapılan çalışmada, temiz ve verimli bir yanma için dizel bir motor bazı tasarımsal değişiklikler yapılarak RCCI konseptli bir motora dönüştürülmüş, devir sayısı değişiminin %30 LRF ön karışım oranı ile birlikte kullanımının motor performans ve emisyonlara etkisi incelenmiştir.

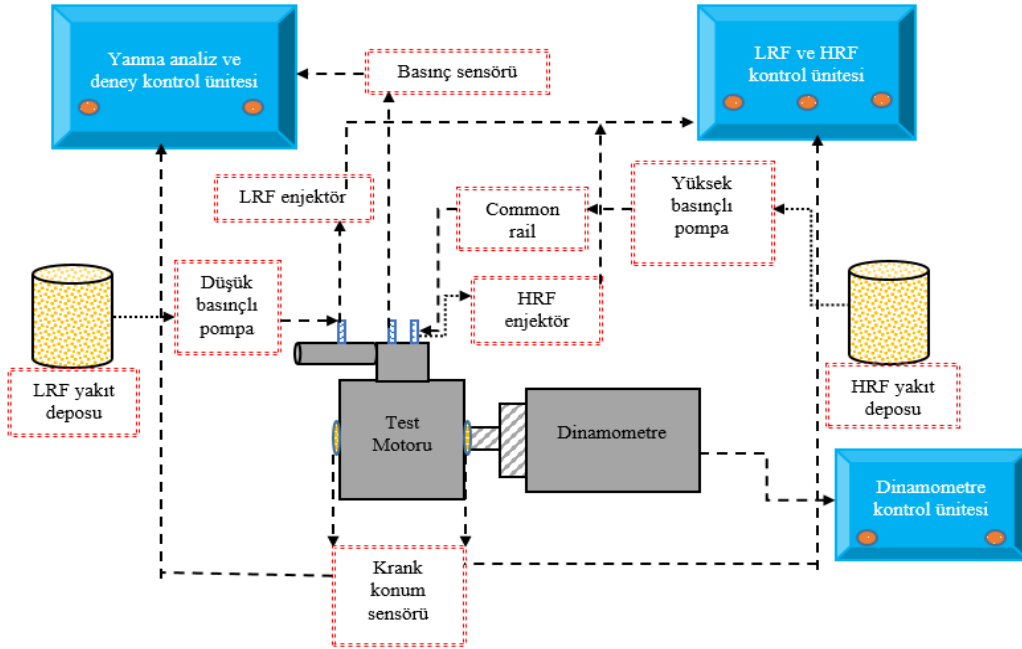
## 2. Materyal ve Yöntem

Yapılan çalışmada motor deneyleri Fırat Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Otomotiv Mühendisliği Bölümü Motor Laboratuvarında bulunan deney düzeneğinde gerçekleştirilmiştir. Deneylerde tek silindirli ve dört zamanlı Common-rail dizel motoru RCCI modunda çalışacak şekilde modifiye edilerek kullanılmıştır. Deneyde kullanılan motora ait teknik özellikler Tablo 1’de verilmiştir.

**Tablo 1.** Motorun teknik özellikleri.

Motorun Markası ve Modeli	Kipor KM 186 F Dizel Motor
Motor tipi	Tek silindirli ve 4 zamanlı
Silindir Çapı x strok	86 mm x 70 mm
Silindir Hacmi	406 cm <sup>3</sup>
Sıkıştırma Oranı	18.1
Maksimum Tork	25.7 Nm @ 2400 d/d
Püskürtme Şekli	Common-Rail Direkt Püskürtme
Püskürtme Basıncı ve zamanı	300 bar/21 °KMA (krank mili açısı) ÜÖNÖ (üst ölü noktadan önce)

Motor Gensan GSA 271 S/4 model elektrikli dinamometreye bağlanarak yükleme gerçekleştirilmiştir. Yük miktarı Zemic L6W marka yük hücresi ile ölçülmüştür. Deneylerde motor yükü %20 ve LRF ön karışım oranı da %30 olarak sabitlenmiştir. Bu yükte motor devri 1500, 2000, 2500 ve 3000 d/d olarak değiştirilmiş, bu durumun performans ve emisyon değerleri üzerindeki etkisi incelenmiştir. Her bir deneyde ölçümler üç defa tekrar edilerek yapılmış ve sonuçların ortalaması alınmıştır. Deney setinin genel görünümü Şekil 1’de verilmiştir.



**Şekil 1.** Deney düzeneği şematik görünümü.

Bu çalışmada, RCCI şartlarında LRF (benzin) bir port yakıt püskürtme sistemi kullanarak 5 bar basınçta emme kanalına püskürtülmüştür. Püskürtme zamanlaması emme supabının açılmasından 15°KMA sonra olarak ayarlanmıştır. HRF’ler (Dizel ve B20) ise doğrudan CRDI ile ÜÖNÖ 21°KMA’da silindire 300 bar basınçla püskürtülmüştür. Yakıt miktarı kontrol paneli üzerinde yer alan yakıt kontrol sistemi kullanılarak ayarlanmıştır. Yakıt tüketimi hacimsel olarak ölçüklendirilmiş yakıt deposu yardımıyla ve hassas teraziler ile doğrulanmıştır.

yapılarak hesaplanmıştır. Deneyler boyunca yakıtın hacimsel olarak tüketimi zamana bağlı olarak hesaplanmış ve motorun hacimsel yakıt debisi bulunmuştur. Elde edilen bu hacimsel yakıt debisi, yakıtın yoğunluğu ile çarpılarak motorun kütleli debisi belirlenmiştir. Yüksek reaktiviteli yakıt olarak kullanılan B20, petrol kökenli ticari dizel yakıtı ile ticari biyodizel yakıtlarının hacimsel olarak %80 ve %20 oranlarında karıştırılması ile elde edilmiştir. Ticari olarak alımı yapılan biyodizel atık yemeklik yağlardan elde edilmiştir ve çalışma kapsamında satın alınmıştır. Petrol kökenli benzin ise yine ticari olarak temin edilmiştir. Deneylerde kullanılan yakıtlara ait bazı özellikler Tablo 2’de görülmektedir.

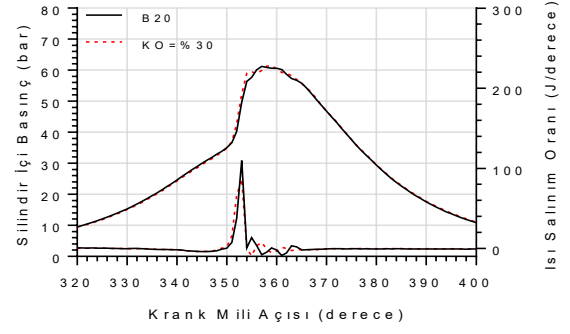
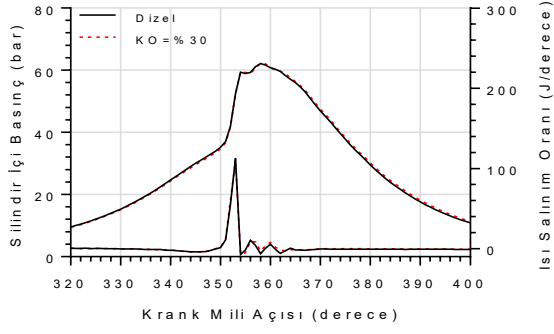
**Tablo 2.** Yakıt özellikleri.

Özellikler	Dizel	Biyodizel	Benzin
Yoğunluk (kg/m <sup>3</sup> )	829.4	883.2	744.4
Kaynama Noktası (°C)	180-350	290-350	38-204
Parlama noktası (°C)	67	180	-45/-35
Kin. Viskozite (mm <sup>2</sup> /sn)	2.889	5.027	0.55
Alt Isıl Değer (MJ/kg)	43.14	38.71	44.1
Buharlaşma Gizli Isısı (kJ/kg )	358	---	---
Kendiliğinden tutuşma sıcaklığı (°C)	210-250	180	228-470
Karbon İçeriği (%)	80.13	73.18	-
Hidrojen İçeriği (%)	12.86	11.39	-
Oksijen İçeriği (%)	6.35	14.75	-
Setan Sayısı	56	53	0-10
Oktan Sayısı	-	-	96

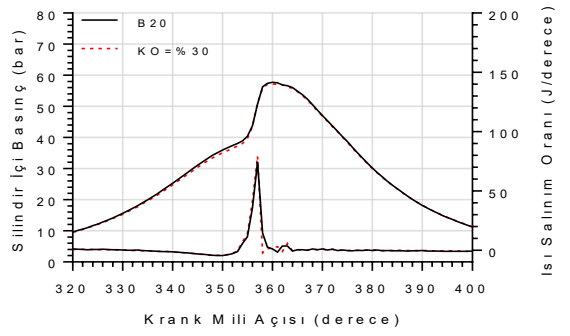
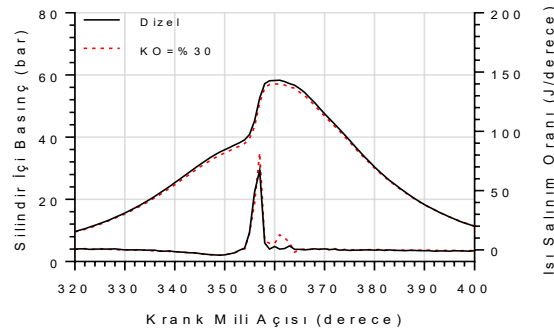
Basınç sensörü olarak Optrand marka sensör ve Kübler marka bir enkoder kullanılmıştır. Elde edilen veriler bir veri toplama kartına aktarılmış ve FebriS ile analiz edilmiştir. Silindir içi gaz basıncının her bir çalışma noktası için 200 ardışık döngü üzerinden ortalaması alınmıştır. Isı salınımı, silindir içi basınç ve hacim değerleri kullanılarak termodinamiğin birinci yasası ile yazılım tarafından hesaplanmıştır. Bu çalışmada RCCI durumunda belirli bir motor yükündeki enerji miktarı geleneksel dizel motorunun bu yükte tükettiği kütleli debiye bağlı oluşan toplam enerji miktarına göre belirlenmiştir. Ayrıca, düşük reaktiviteli yakıtın karışım oranı (KO) için çevrim başına motora verilen toplam enerji hesaplanarak belirlenmiştir. Çevrim başına motora verilen enerji sabit tutulup bu enerji üzerinden karışım oranı hesaplanmıştır. Bunun için düşük reaktiviteli yakıtın kütleli debisi ve alt ısıl değerinin çarpımı, düşük ve yüksek reaktiviteli yakıtların kütleli debisi ve alt ısıl değerlerinin çarpımlarının toplamına bölünmüştür. Deneyler için motor yükü %20 ve LRF ön karışım oranı %30 olarak belirlenmiştir.

### 3. Bulgular ve Tartışma

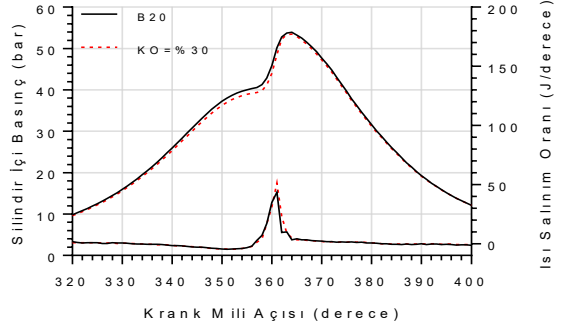
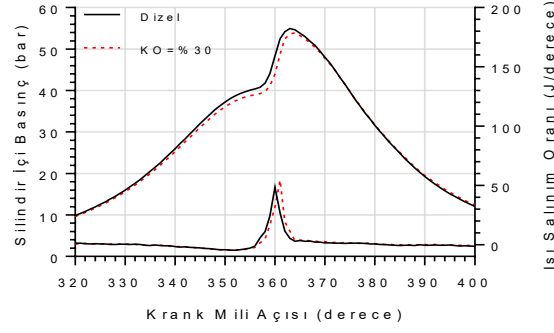
Yapılan çalışma %20 sabit motor yükünde, LRF karışım oranının %30 olduğu ve motor devri değişimi sonucunda elde edilen sonuçların motor performans ve emisyon karakteristiği hakkında bilgileri içermektedir. İlk olarak motor performansına hakkında bilgi veren silindir içi basınç, ısı salınım oranı, maksimum basınç artış oranı, OİB ve silindir içi sıcaklık değişimi bilgileri sunulmuştur. Daha sonra CO, HC NO<sub>x</sub> ve duman opaklığı emisyonlarına ait değişimlerin verildiği grafikler detaylı olarak anlatılmıştır.



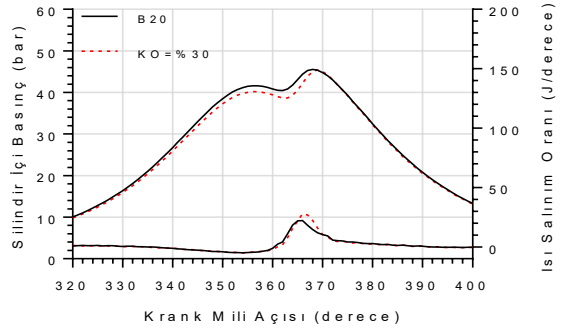
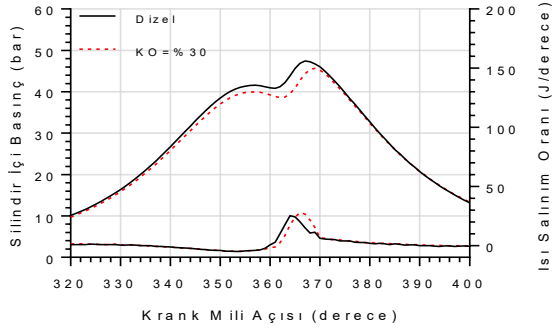
1500 d/d



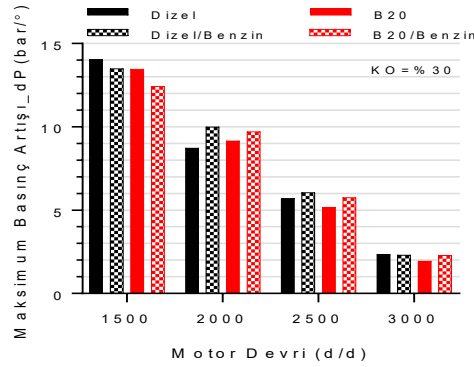
2000 d/d



2500 d/d

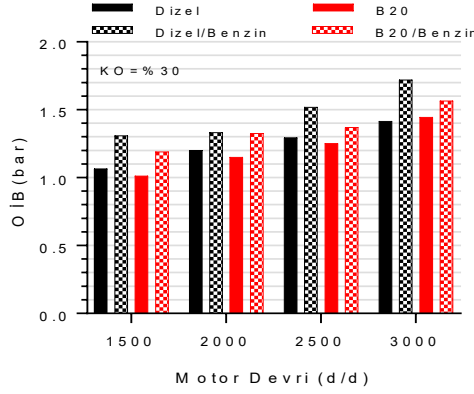


3000 d/d



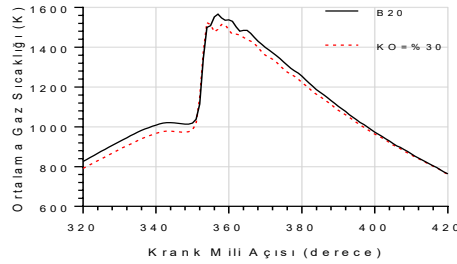
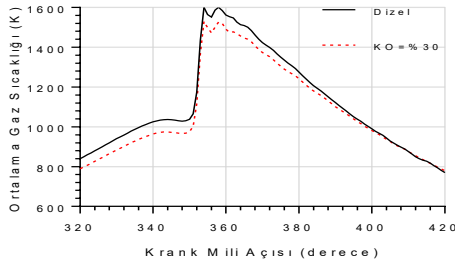
Şekil 2. Farklı motor devirlerinde dizel ve B20 yakıtları için silindir içi basınç, ısı salınım oranları ve silindir içi maksimum basınç artışının değişimi.

Şekil 2’de her iki HRF için %20 yük ve %30 LRF ön karışım oranında motor devrinin değişiminin silindir içi basınç değişimi, ısı salınım oranı ve maksimum basınç artışının değişimini içeren veriler grafik halinde sunulmuştur. Veriler incelendiğinde, motor devrinin 1500 olduğu, hem dizel hem de B20’nin kullanıldığı deneylerde LRF kullanımının silindir içi basınç ve ısı salınım oranı üzerindeki etkinin az olduğu, buna karşın devir sayısı arttıkça LRF kullanımının silindir içi basıncı bir miktar azalttığı, ısı salınımını ise artırdığı belirlenmiştir. Hem silindir içi basınç hem de ısı salınımında oluşan bu değişimlerin pik değerlerinin HRF’lere göre 1-3 krank açısı ötelendiği de ayrıca görülmüştür. Devir sayısı ilerledikçe oluşan bu azalma hızında artış belirlenmiştir. 1500 ve 2000 motor devrinde yanma için gerekenden fazla süre bulunmaktadır. Bu süreden dolayı, burada oluşan değişim üzerinde HRF ve LRF arasındaki termofiziksel özelliklerin ve karışım oranının farklı olmasının etkileri çok az olduğu görülmüştür. Yine süreden dolayı silindirde zengin reaktif bölgelerinin sayısı artmıştır. 1500 ve 2000 devir deneylerinde motor devir hızının az olması HRF yakıtlarının silindire püskürtülmesi ile birlikte başlayan ani yanmanın hem basınç hem de ısı salınımını hızlı bir şekilde yükselttiği daha sonra devam eden püskürtülen yakıtın etkisi ile de yanmanın verimsiz olsa da devam ettiği görülmektedir. 2500 d/d göz önüne alındığında ise, 2000 d/d’ye kıyasla her iki HRF için LRF kullanımının silindir içindeki basınç pik değerini azalttığı görülmüştür. Artan motor devrine bağlı olarak yanma için gereken süre azalmasına rağmen yanma süreci 2000 devre göre daha kontrollü oluşmuştur. Bu devirde LRF’nin buharlaşma ısısından ve yüksek oktan içerinden dolayı tutuşma gecikmesinin uzamasına etki etmiş, yanmanın düşük sıcaklıkta meydana gelmesini sağlamış ve buna bağlı olarak maksimum basınç değerlerini hem dizel hem de B20 için azaltmış, ısı salınım oranını ise artırmıştır [32]. 3000 devir deneylerinde bu durum daha da ilerlemiştir. Artan motor devri ile birlikte yanmanın gerçekleşebilmesi için gereken süre kısalmıştır. Bu yüzden yanma reaksiyonları kısmen gerçekleşmiş ve buna bağlı olarak silindir içi maksimum basınç noktası ÜÖN’den diğer devirlere kıyasla yaklaşık olarak 4-8 derece sonra oluşmuştur. Bu devirde LRF kullanımı ile tutuşma gecikmesi uzamış ve maksimum basınç değeri azalmıştır. Tüm devirlerde LRF kullanımı ile ısı salınımının artış gösterdiği belirlenmiştir. Özellikle ısı salınımında 2000 ve 2500 devirde LRF kullanımı ile %40 oranında bir artış olduğu tespit edilmiştir. Devir değişiminin ve LRF kullanımının maksimum basınç artışı üzerindeki etkisi de yine şekil 2’de verilen grafiklerinden açık bir şekilde görülmektedir. Şekilde görüldüğü gibi motor devir sayısı arttıkça silindir içinde oluşan maksimumum basınç artış değerleri azalmıştır. Gelişen bu durum basınç değişimi verileri ile uyum halindedir. Maksimum basınç artışının değişiminin 1500 devir deneylerinde LRF kullanıldığında HRF’lere kıyasla azaldığı görülmüştür. Bunun dışında tüm devir deneylerinde LRF kullanımı ile maksimum basınç artışında bir artış olduğu görülmüştür. Bu durumun LRF kullanımı ile tutuşma gecikmesinin uzamasından kaynaklandığı tespit edilmiş ve daha önceki veriler ile de uyumlu olduğu değerlendirilmiştir.

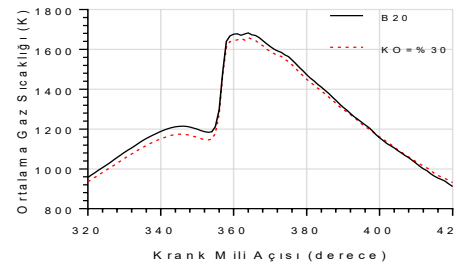
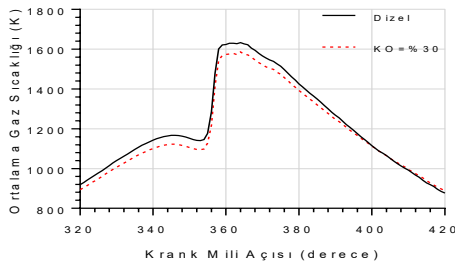


Şekil 3. Farklı motor devirleri ve LRF kullanımında OİB'nin değişimi.

Şekil 3'te farklı motor devirlerinde B20 ve dizel yakıtları için LRF kullanımının OİB değeri üzerindeki etkisinin incelendiği verileri grafik halinde sunulmuştur. Motor devrinin artması ile OİB değerin de kademeli olarak arttığı belirlenmiştir. LRF uygulanması sonucunda elde edilen OİB verileri her iki HRF'den elde edilen veriler kıyaslandığında, LRF kullanımı ile elde edilen OİB değerlerinde gözle görülür bir artışa sebep olduğu grafiklerde görülmektedir. Şekil 2'de verilen grafiklerde göz önüne alındığında, maksimum basınç ve basınç artışı değerinin hangi krank açısında elde edildiği motordan elde edilen OİB değerini doğrudan etkilediği değerlendirilmiştir [24]. Buradan hareketle, özellikle 1500 ve 2000 devirlerde HRF'ler kullanıldığında oluşan kararsız yanmaya rağmen bu devirler dâhil tüm devirlerde LRF kullanımının maksimum basınç değerlerini düşürdüğü görülmüştür. Burada LRF kullanımı ile oluşan daha düşük basınca rağmen yanma sürecinin HRF'lere göre optimum seviyede olması ve dolgu içindeki yüksek homojen yapı sebebiyle OİB değerinin artışı yönde etkilemiştir. Tüm bu durumlara ek olarak, silindir içi basınç değişimi ve maksimum basınç artışının oluştuğu krank açılarına göre, silindir içinde oluşan negatif iş-pozitif iş dengesinin OİB değerini belirlediği düşünülmektedir. Son olarak, dizel yakıtının genel olarak B20 yakıtına göre genel olarak tüm devirlerde büyük çoğunlukla daha yüksek bir OİB değerine ulaştığı görülmüştür. Bu durumun B20 yakıtının dizele göre oksijen içeriği fazlalığına sahip olmasına rağmen düşük ısı değere sahip olmasından kaynaklandığı düşünülmüştür. Ayrıca, kullanılan yöntem ile LRF kullanımının OİB'yi tüm devirlerde artırmasının RCCI konsepti adına önemli olduğu değerlendirilmiştir.

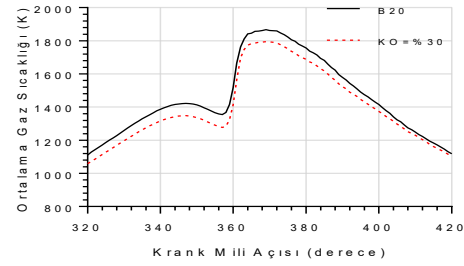
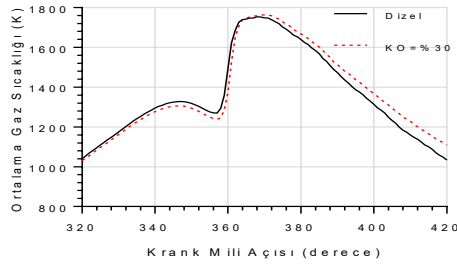


1500 d/d

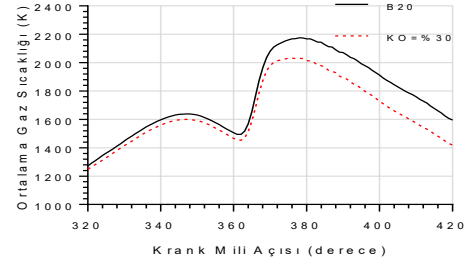
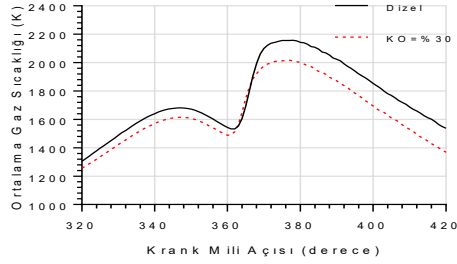


2000 d/d

Reaktivite Kontrollü Sıkıştırma Ateşlemeli Bir Motorda Motor Devrinin Yanma ve Emisyon Karakteristikleri Üzerindeki Etkisinin Araştırılması



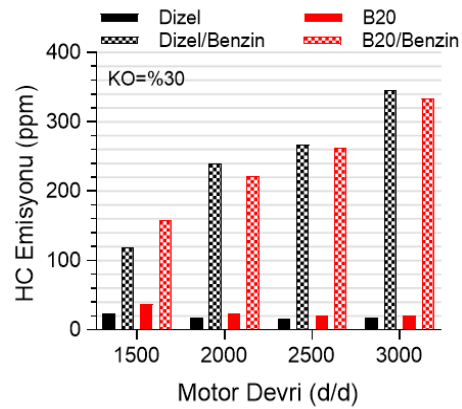
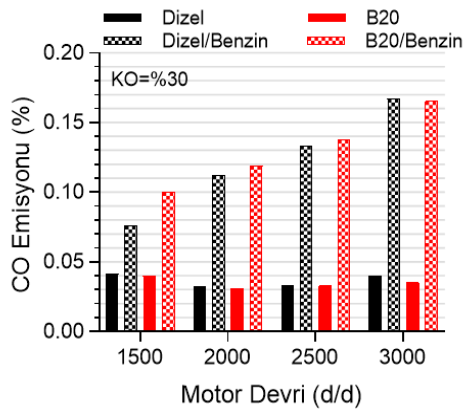
2500 d/d



3000 d/d

Şekil 4. Farklı motor devirlerinde LRF kullanımının silindir içi gaz sıcaklıkları üzerindeki etkisi.

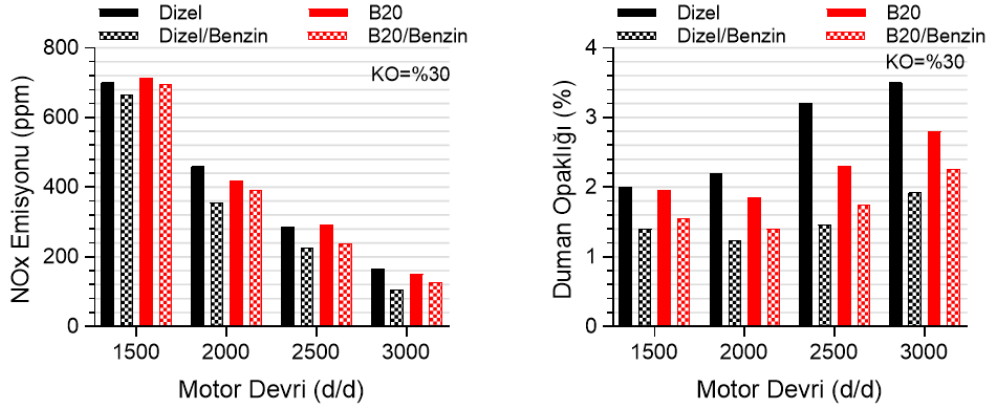
Şekil 4'te RCCI konseptli motorda LRF kullanımının değişen motor devir sayısının silindir içi sıcaklık değerleri üzerindeki etkilerinin gösterildiği grafikleri içermektedir. Grafikler incelendiğinde, değişen motor devirlerine karşılık her iki HRF için kullanılan LRF etkisi ile sıcaklıklarda azalma olduğu görülmektedir. Özellikle her iki HRF için 1500 ve 2000 d/d durumlarında ani sıcaklık yükselmelerinin olduğu ve çok kısa krank açılarında maksimum sıcaklık devirlerine ulaşıldığı görülmüştür. Bu devirlerde LRF kullanımı ile bu ani yükselmeleri kısmen kontrol altına almıştır. Devir sayısının 2500 ve 3000'e ilerlemesi ile birlikte silindir içine alınan dolgu miktarı da artmış ve sıcaklık değerleri de buna bağlı olarak artmıştır. Oluşan bu artışın daha önceki devirlere göre ani bir şekilde yükselmediği görülmüştür. Bu devirlerde LRF kullanımının yine sıcaklıklarda düşüşe neden olduğu görülmüştür. Yüksek buharlaşma ısısının sıcaklığı azalttığı bilinen bir durumdur [33]. Ayrıca, önceki devirlere göre sıcaklık artışının ani yükselmeler göstermemiş olsa da motor devrinin yüksek olması içeride oluşan dolgunun tam olarak reaksiyona girememesine sebep olduğu görülmüştür. Özetle, LRF kullanımının silindir içi sıcaklık değerlerini tüm devir deneylerinde azalttığı tespit edilmiştir. Bu azalma seviyesinin değişen devire göre farklılık gösterdiği görülmüştür. Düşük devirlerde sıcaklık düşük olsa da ani artışlar olduğu ve sıcaklık artışının kontrolsüz geliştiği, yüksek devirlerde ise bu artışın kontrollü olarak gerçekleştiği tespit edilmiştir. Sıcaklıkta meydana gelen bu değişimin hem dizel hem de biyodizel sonuçlarında benzer seyir izlediği belirlenmiştir.





**Şekil 5.** Farklı motor devirlerinde LRF kullanımının CO ve HC emisyonları üzerindeki etkisi.

Şekil 5 farklı motor devirlerinde oluşan CO ve HC emisyonlarının, LRF kullanımı ile değişimini göstermektedir. CO emisyonunun LRF kullanımı ve devir değişimine göre gösterdiği tepki incelendiğinde, hem B20 hem de dizel yakıtlı duruma göre LRF kullanımının CO oranını kademeli artırdığı görülmektedir. Yine yapılan çalışmada yine tüm devirlerde LRF kullanımının HC emisyon seviyesini artırdığı görülmektedir. LRF kullanımının tüm devirlerde aynı etkiyi göstermesinin temel olarak bir sebepten olduğu düşünülmektedir. Tüm motor devir deneylerinde ve her iki HRF içinde LRF kullanımının doğrudan CO ve HC emisyonunu artırmasının temel sebebinin, silindir içi sıcaklık değeri ve dolgunun yanması için gerekli zamana bağlı olduğu düşünülmektedir. RCCI konseptli motorlarda emme zamanında silindire enjekte edilen LRF'nin tüm sıkıştırma zamanı boyunca silindirde ve cidarlarda soğuk bölgeler oluşturduğu, bunun değişen devir sayısına bağlı olarak CO ve özellikle HC emisyonu oluşturmada artırıcı bir etkiye sebep olduğu belirlenmiştir [25-28]. Sonuç olarak, yapılan çalışmada LRF olarak benzin kullanımının dizel ve B20'nin HRF olarak kullanıldığı tüm devir deneylerinde CO ve HC emisyonunu artırdığı belirlenmiştir. Dizel HRF deneyinde LRF kullanımında CO emisyonunun B20'ye göre daha fazla, HC emisyonunda ise B20 deneyinde oluşan HC emisyonunun dizele göre daha fazla olduğu görülmüştür. Bu durumun B20'nin yapısındaki oksijen ve karbon oranına bağlı olduğu değerlendirilmiştir.

**Şekil 6.** Farklı motor devirlerinde LRF kullanımının NOx emisyonu ve duman opaklığı üzerindeki etkisi.

Şekil 6 farklı motor devirlerinde LRF kullanımının NOx ve duman opaklığı üzerine olan etkisini göstermektedir. Yapılan incelemede, devir sayısı arttıkça NOx emisyonunun azaldığı görülmüştür. Tüm devirlerdeki NOx emisyonu üzerindeki LRF etkisine bakıldığında, LRF kullanımının NOx emisyonunu azaltıcı bir etkide bulunduğu tespit edilmiştir. Ayrıca, B20'nin HRF olarak kullanıldığı deneylerde dizele göre kısmen de olsa fazla oranda NOx emisyonu oluştuğu gözlenmiştir. Bu durumun doğrudan silindir içindeki oksijen oranı, ani yanma süreci ve en önemlisi silindir içi sıcaklık değişimi ile alakalı olduğu düşünülmektedir. NOx emisyonunun sıcaklık değerinin 1800 K civarına yükselmesi ile ortamda bulunan oksijen ve azot atomunun reaksiyona girmesiyle oluştuğu bilinmektedir [29, 30]. Bu bağlamda, B20 ve dizel yakıtları için silindir içindeki sıcaklık değeri ve hava fazlalığı göz önüne alındığında, NOx oluşumu için gereken değerlerin yakalandığı ve bu yakıtlar için NOx değerlerinin yüksek olduğu görülmektedir. Daha sonra silindire gönderilen LRF ile tüm devirlerde HRF'lere göre NOx emisyonlarının azaldığı görülmüştür. LRF kullanımı ile silindirde soğuk bölgelerin arttığı ve bununda HRF'lere kıyasla daha az NOx emisyonu oluşturduğu değerlendirilmiştir. Şekil 6'da ayrıca duman opaklığına ait değişimde verilmiştir. Tüm motor devirlerinde LRF kullanımının duman opaklığı HRF'lere kıyasla önemli derecede azalttığı belirlenmiştir. Ayrıca devir sayısı arttıkça duman opaklığında arttığı belirlenmiştir. Burada da görüldüğü gibi motor devri arttıkça silindire alınan dolgu miktarı artmış fakat yanma için gereken süre azalmıştır. Yanma sürecinin çok kısa sürelerde gerçekleşmek zorunda olması ile silindirde bulunan karbon bileşikleri yanma reaksiyonlarına tam olarak katılamamış ve egzozdan atılmıştır. Bu karbon parçacıklarının da duman opaklığını artırdığı değerlendirilmiştir. Tüm veriler incelendiğinde B20 yakıtının kullanıldığı durumdaki duman opaklığı seviyesinin dizele kıyasla daha az olduğu belirlenmiştir. Bu durumun dolgu içindeki oksijen miktarına bağlı olduğu düşünülmektedir. B20 yakıtı içindeki oksijen miktarının fazlalığı karbon ve oksijenin silindirdeki yanma şartlarına bağlı olarak farklı emisyon türleri oluşturmasını sağlamış ve duman opaklığının azalmasını sağlamış olduğu düşünülmektedir. Sonuç olarak, kullanılan yöntem ile hem dizel hem de B20 yakıtlı

deneylerde LRF kullanımı ile NO<sub>x</sub> ve duman opaklığında azalmalar olduğu belirlenmiştir. Deneylerde kullanılan B20'nin duman opaklığını azaltmada dizele göre daha başarılı olduğu belirlenmiştir. NO<sub>x</sub> emisyonunda ise dizel göre çok az oranda bir artış olduğu saptanmıştır.

#### 4. Sonuçlar

Yapılan deneysel çalışmada, RCCI konseptli dizel bir motorda HRF olarak dizel ve B20, LRF olarak da benzin kullanılmıştır. Çalışma %20 sabit motor yükünde, motor devir sayısının değiştiği ve bu değişimin performans ve emisyonlara etkisini içermektedir. Çalışmaya ait veriler yukarıda sunulmuştur. Aşağıda çalışmadan elde edilen önemli noktalar sunulmuştur.

- RCCI konseptli motorda yapılan deneylerde LRF uygulamasının silindir içi basıncı azalttığı ısı salınımını ise artırdığı belirlenmiştir. Yine tüm devirlerde LRF kullanımının OİB'yi artırdığı belirlenmiştir. Devir sayısı arttıkça LRF etkisinin de arttığı, bu artışta HRF olarak dizel kullanımının B20'ye göre kısmen daha başarılı olduğu saptanmıştır.
- Yapılan çalışmada LRF kullanımının silindir içi sıcaklığı hem dizel hem de biyodizel deneylerinde azalttığı devir sayısı arttıkça azalma oranının da arttığı belirlenmiştir.
- LRF kullanımı ile CO ve HC emisyonunu tüm devirlerde artırdığı belirlenmiştir. HRF olarak B20'nin kullanıldığı deneylerde HC emisyonunda dizele göre nispeten bir azalma olduğu gözlenmiştir. Ayrıca devir sayısı arttıkça CO ve HC emisyonunun arttığı belirlenmiştir.
- LRF kullanımı ile NO<sub>x</sub> ve duman opaklığının devir sayısına göre değişimi incelenmiştir. Burada, dizel ve B20 yakıtlı deneylerde LRF uygulaması ile NO<sub>x</sub> emisyonunun tüm devirlerde azaldığı, en büyük azalmanın dizelin HRF olarak kullanıldığı deneylerde ve LRF uygulanması ile oluştuğu görülmüştür. NO<sub>x</sub> emisyonunun özellikle devir sayısı arttıkça azaldığı tespit edilmiştir. Son olarak devir sayısı arttıkça LRF uygulaması ile duman opaklığında azalma oranının arttığı saptanmıştır. Ayrıca, duman opaklığının da yine LRF uygulaması ile azaldığı bu azalmada dizele uygulanan LRF ile daha büyük oranlarda bir azalma olduğu saptanmıştır.

#### Teşekkür

Bu çalışma, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından 118M650 numaralı proje ile desteklenmiştir. Yazarlar, sağladığı destekten dolayı TÜBİTAK'a teşekkür eder.

#### Kaynaklar

- [1] Reitz RD, Duraisamy G. Review of high efficiency and clean reactivity controlled compression ignition (RCCI) combustion in internal combustion engines. *Progress in Energy and Combustion Science* 2015; 46: 12-71.
- [2] Li Y, Jia M., Chang Y, Xie M, Reitz RD. Towards a comprehensive understanding of the influence of fuel properties on the combustion characteristics of a RCCI (reactivity controlled compression ignition) engine. *Energy* 2016; 99: 69-82.
- [3] d'Ambrosio S, Iemmolo D, Mancarella A, Vitolo R. Preliminary optimization of the PCCI combustion mode in a diesel engine through a design of experiments. *Energy Procedia* 2016; 101: 909-916.
- [4] Krishnamoorthi M, Malayalamurthi R, He Z, Kandasamy S. A review on low temperature combustion engines: Performance, combustion and emission characteristics, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2019; 116: 109404.
- [5] Kokjohn SL, Hanson RM, Splitter DA, Reitz RD. Fuel reactivity controlled compression ignition (RCCI): A pathway to controlled high-efficiency clean combustion. *Int. J. Engine Res. Vol.* 2011; 12(3): 209-226.
- [6] Li J, Yang W, Zhou D. Review on the management of RCCI engines. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2017; 69: 65-79.
- [7] Kokjohn SL, Reitz RD. Reactivity controlled compression ignition and conventional diesel combustion: A comparison of methods to meet light-duty NO<sub>x</sub> and fuel economy targets. *Int. J. Engine Res.* 2013; 14(5): 452-468.
- [8] Zhong Y, Han W, Jin C, Tian X, Liu H. Study on effects of the hydroxyl group position and carbon chain length on combustion and emission characteristics of Reactivity Controlled Compression Ignition (RCCI) engine fueled with low-carbon straight chain alcohols. *Energy* 2021: 122259.
- [9] Zhao W, Zhang Y, Huang G, He Z, Qian Y, Lu X. Experimental investigation on combustion and emission characteristics of butanol/biodiesel under blend fuel mode, dual fuel RCCI and ICCI modes. *Fuel* 2021; 305: 121590.
- [10] Okcu M, Varol Y, Altun Ş, Fırat M. Effects of isopropanol-butanol-ethanol (IBE) on combustion characteristics of a RCCI engine fueled by biodiesel fuel. *Sustainable Energy Technologies and Assessments* 2021; 47: 101443.
- [11] Nazemi M, Shahbakhti M. Modeling and analysis of fuel injection parameters for combustion and performance of an

- RCCI engine. *Applied Energy* 2016; 165: 135-50.
- [12] Uyumaz A, Solmaz H. RCCI bir motorda enjeksiyon zamanlaması ve lamdanın yanma ve performans karakteristikleri üzerindeki etkilerinin deneysel incelenmesi. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part:C, Tasarım Ve Teknoloji* 2016; 4(4): 299-308.
- [13] Zhou DZ, Yang WM, An H, Li J. Application of CFD-chemical kinetics approach in detecting RCCI engine knocking fuelled with biyodisel/methanol. *Applied Energy* 2015; 145: 255-264.
- [14] Navaneeth PV, Suraj CK, Mehta PS, Anand K. Predicting the effect of biodiesel composition on the performance and emission of a compression ignition engine using a phenomenological model. *Fuel* 2021; 293: 120453.
- [15] Canakci M, Erdil A, Arcaklioğlu E. Performance and exhaust emissions of a biodiesel engine. *Applied energy* 2006; 83(6): 594-605.
- [16] Wang WG, Lyons DW, Clark NN, Gautam M, Norton PM. Emissions from nine heavy trucks fueled by diesel and biodiesel blend without engine modification. *Environ. Sci. Technol.* 2000; 34(6): 933-939.
- [17] Oni BA, Oluwatosin D. Emission characteristics and performance of neem seed (*Azadirachta indica*) and *Camelina* (*Camelina sativa*) based biodiesel in diesel engine. *Renewable Energy* 2020; 149: 725-734.
- [18] Ellappan S, Rajendran S. A comparative review of performance and emission characteristics of diesel engine using eucalyptus-biodiesel blend. *Fuel* 2021; 284: 118925.
- [19] Benajes J, García A, Monsalve-Serrano J, Sari RL. Fuel consumption and engine-out emissions estimations of a light-duty engine running in dual-mode RCCI/CDC with different fuels and driving cycles, *Energy* 2018; 157: 19-30.
- [20] Imtenan S, Varman M, Masjuki HH, Kalam MA, Sajjad H, Arbab MI, Rizwanul Fattah IM. Impact of low temperature combustion attaining strategies on diesel engine emissions for diesel and biodiesels: A review. *Energy Conversion and Management* 2014; 80: 329-356.
- [21] Li J, Yang, WM, An H, Zhao D. Effects of fuel ratio and injection timing on gasoline/biodiesel fueled RCCI engine: A modeling study. *Applied Energy* 2015; 155: 59-67.
- [22] Molina S, García A, Pastor JM, Belarte E, Balloul I. Operating range extension of RCCI combustion concept from low to full load in a heavy-duty engine. *Applied Energy* 2015; 143: 211-227.
- [23] Dempsey AB, Walker NR, Reitz RD. Effect of piston bowl geometry on dual fuel reactivity controlled compression ignition (RCCI) in a light-duty engine operated with gasoline/diesel and methanol/diesel. *SAE International Journal of Engines* 2013; 6(1): 78-100.
- [24] ANSYS Forte 17.0, ANSYS: San Diego, 2017.
- [25] Abdelaal MM, Rabee BA, Hegab AH. Effect of adding oxygen to the intake air on a dual-fuel engine performance, emissions, and knock tendency. *Energy* 2013; 61: 612-620.
- [26] Acharya SK, Jena SP. Performance and emission analysis of a CI engine in dual mode with LPG and Karanja oil methyl ester. *International Scholarly Research Notices* 2013.
- [27] Yao M, Chen Z, Zheng Z, Zhang B, Xing Y. Study on the controlling strategies of homogeneous charge compression ignition combustion with fuel of dimethyl ether and methanol. *Fuel* 2006; 85(14-15): 2046-2056.
- [28] Han J, Bao H, Somers LMT. Experimental investigation or reactivity controlled compression ignition with n-butanol/n-heptan in a heavy-duty diesel engine. *Applied Energy* 2021; 282: 116164.
- [29] Carlucci AP, de Risi AD, Laforgia D, Naccarato F. Experimental investigation and combustion analysis of a direct injection dual-fuel diesel-natural gas engine. *Energy* 2008; 33(2): 256-263.
- [30] Kannan S, Mahalingam S, Srinath S, Sivasankaran M. An experimental study in HCCI combustion of LPG in diesel engine. *Materials Today: Proceedings* 2021; 37: 3625-3629.
- [31] Chaudhari VD, Deshmukh D. Diesel and diesel-gasoline fuelled premixed low temperature combustion (LTC) engine mode for clean combustion. *Fuel* 2020; 266: 116982.
- [32] Wei L, Yao C, Han G, Pan W. Effects of methanol to diesel ratio and diesel injection timing on combustion, performance and emissions of a methanol port premixed diesel engine. *Energy* 2016; 95: 223-232.
- [33] Firat M, Altun S, Okcu M, Varol Y. Investigation of the effect of gasoline premixed ratio and engine load on the combustion and exhaust emission characteristics of an RCCI Engine. *Journal Of The Faculty Of Engineering And Architecture Of Gazi University* 2022; 37(1): 541-554.