



## Investigation of the effect of gasoline premixed ratio and engine load on the combustion and exhaust emission characteristics of an RCCI Engine

Müjdat Fırat<sup>1\*</sup>, Şehmus Altun<sup>2</sup>, Mutlu Okcu<sup>3</sup>, Yasin Varol<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Department of Automotive Engineering, Fırat University, Elazığ, 23119, Turkey

<sup>2</sup>Department of Mechanical Engineering, Batman University, Batman, 72100, Turkey

<sup>3</sup>Department of Electrical-Electronic Engineering, Ardahan University, Ardahan, 75002, Turkey

### Highlights:

- The effect of LRF mixing ratio on engine performance and exhaust emissions has been examined.
- Thermal efficiency is increased at low mixing ratios
- Smoke opacity reduced at all engine loads

### Keywords:

- RCCI
- Biodiesel
- Diesel
- Gasoline
- Combustion

### Graphical/Tabular Abstract

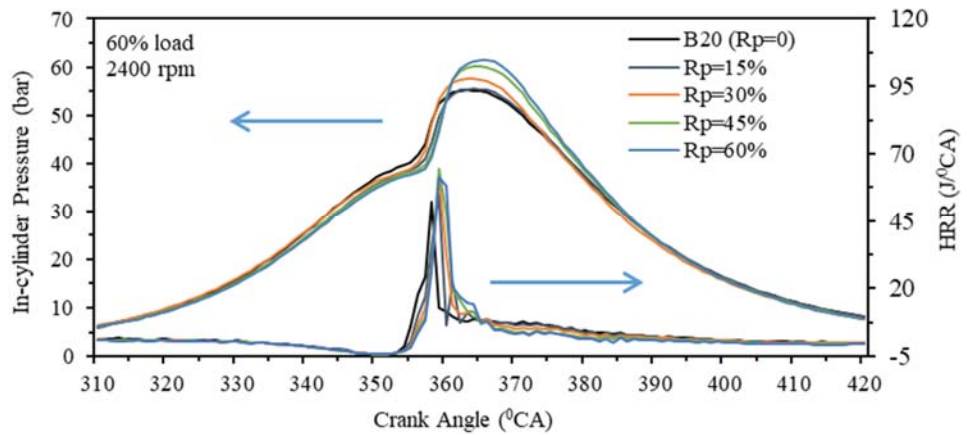


Figure A. Change of in-cylinder pressure and heat release rate with mixing ratio

### Article Info:

Research Article

Received: 23.02.2021

Accepted: 25.07.2021

### DOI:

10.17341/gazimmfd.885488

### Acknowledgement:

The Scientific and Technological Research Council of Turkey (TUBITAK) is greatly acknowledged for financial support with project number 118M650.

### Correspondence:

Author: Müjdat Fırat

e-mail:

mujdatfirat@gmail.com,

phone: +90 424 237 00 00 / 4375

**Purpose:** It is aimed to investigate the change of parameters such as in-cylinder pressure, heat release rate and knock intensity in both RCCI and conventional combustion modes at medium-high loads and constant engine speed. In addition, using the RCCI concept, it is aimed to observe the change of exhaust emission values.

### Theory and Methods:

Harmful emissions resulting from diesel engines have become a significant environmental and human health issue. To reduce these emissions without any loss of engine performance, the concept of RCCI, which is an LTC theory, has emerged as the most appropriate method to accomplish this goal. This study was conducted experimentally. In experiments, a single cylinder diesel engine has been used. To modify RCCI, the engine was modified by locating a PFI in the intake manifold. While a PFI injector is used for LRF injection, direct injection is used for HRF injection. Gasoline was used as LRF, while biodiesel(B20) was used as HRF.

### Results:

It was observed that using the mixture ratio as 15% and 30% increased the mean indicated pressure and thermal efficiency at all loads, and there was no significant change in other mixing ratios. Under RCCI conditions, when the engine was running at no load and at low loads such as 20%, NOx emission was reduced, but an increase was observed with the increase of engine load. However, smoke opacity was reduced at all loads, which was by 96% at 60% load and with the use of 60% mixing ratio. Apart from an increase in CO emission under RCCI conditions at 60% load, it was observed that CO and unburned HC emission levels increased with the increase of the mixing ratio at all loads under RCCI conditions.

### Conclusion:

Smoke opacity was reduced at all loads with the use of the RCCI. By using the RCCI concept, it was determined that NO emissions were decreased especially at 0% and 20% engine loads. Also, as LRF ratio increased, CO emissions were decreased at 60% load. Finally, it was determined that HC emissions were increased with the use of LRF.



## Bir RCCI motorun yanma ve egzoz emisyon karakteristikleri üzerinde benzin ön karışım oranı ve motor yükünün etkisinin incelenmesi

Müjdat Fırat<sup>1\*</sup>, Şehmus Altun<sup>2</sup>, Mutlu Okcu<sup>3</sup>, Yasin Varol<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Fırat Üniversitesi, Otomotiv Mühendisliği Bölümü, 23119, Elazığ, Türkiye

<sup>2</sup>Batman Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 72060, Batman, Türkiye

<sup>3</sup>Ardahan Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, 75002, Ardahan Türkiye

### Ö N E Ç İ K A N L A R

- LRF karışım oranının motor performansı ve egzoz emisyonlara etkisi incelenmiştir
- Düşük karışım oranlarında termik verim artmıştır
- Duman opaklığı tüm motor yüklerinde azalmıştır

### Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 23.02.2021

Kabul: 25.07.2021

DOI:

10.17341/gazimmfd.885488

### Anahtar Kelimeler:

RCCI,  
biyodizel,  
dizel,  
benzin,  
yanma

### ÖZ

Bu çalışmada, RCCI modunda çalışacak şekilde modifiye edilmiş tek silindirli bir dizel motorda biyodizel ve petrol kökenli dizel karışımı ile benzin kullanımının yanma ve egzoz emisyon karakteristiklerine etkisi deneysel olarak incelenmiştir. Çalışmada hacimsel olarak %20 biyodizel ve %80 petrol kökenli dizel karışımından oluşan B20 karışım yakıtı yüksek reaktiviteli yakıt olarak doğrudan silindir içerisine püskürtülürken; düşük reaktiviteli yakıt olarak ta benzin emme kanalına püskürtülmüştür. Deneyler %0 (geleneksel dizel yanma), %15, %30, %45 ve %60 olmak üzere beş farklı ön karışım oranlarında ve sabit motor hızı ile değişik yük şartlarında gerçekleştirilmiştir. Elde edilen verilere göre, %0 ve %20 yükte RCCI şartlarında karışım oranının artması ile silindir içi maksimum basınç değerinin azaldığı, %40 ve %60 yükte ise arttığı belirlenmiştir. RCCI şartlarında motor yüksüz ve %20 gibi düşük yüklerde çalışırken NO<sub>x</sub> emisyonunda azalma sağlanmış ancak motor yükünün artması ile artış olduğu gözlenmiştir. Bununla birlikte tüm yüklerde karışım oranı artışının duman koyuluğunu azalttığı belirlenmiştir. Özellikle %60 yük durumunda ve %60 karışım oranı kullanımı ile duman koyuluğunun %96 oranında azaldığı tespit edilmiştir. %60 yükte RCCI şartlarında CO emisyonunda bir azalış olmasının dışında CO ve yanmamış HC emisyon seviyeleri RCCI şartlarında tüm yüklerde karışım oranının artışı ile arttığı görülmüştür.

## Investigation of the effect of gasoline premixed ratio and engine load on the combustion and exhaust emission characteristics of an RCCI Engine

### H I G H L I G H T S

- The effect of LRF mixing ratio on engine performance and exhaust emissions has been examined.
- Thermal efficiency is increased at low mixing ratios
- Smoke opacity reduced at all engine loads

### Article Info

Research Article

Received: 23.02.2021

Accepted: 25.07.2021

DOI:

10.17341/gazimmfd.885488

### Keywords:

RCCI,  
biyodizel,  
dizel,  
gasoline,  
combustion

### ABSTRACT

In this study, the effect of using biodiesel and petroleum-based diesel mixture and gasoline on combustion and exhaust emission characteristics in a single cylinder diesel engine modified to operate in RCCI mode was experimentally investigated. In the study, B20 mixture fuel, which consists of 20% biodiesel and 80% petrol-based diesel mixture by volume, was sprayed directly into the cylinder as a high reactivity fuel while gasoline as a low reactivity fuel was injected into the suction channel. The experiments were carried out in five different premixed ratios as 0% (conventional diesel combustion), 15%, 30%, 45% and 60%, and under different load conditions with constant engine speed. According to the data obtained, it was determined that the maximum pressure value in the cylinder decreased with the increase of the mixture ratio under RCCI conditions at 0% and 20% load, and increased at 40% and 60% load. Under RCCI conditions, when the engine was running at no load and at low loads such as 20%, NO<sub>x</sub> emission was reduced, but an increase was observed with the increase of engine load. However, it has been determined that the increase in the mixture ratio at all loads reduces the smoke opacity, which was by 96% at 60% load and with the use of 60% mixing ratio. Apart from an decrease in CO emission under RCCI conditions at 60% load, it was observed that CO and unburned HC emission levels increased with the increase of the mixing ratio at all loads under RCCI conditions.

\*Sorumlu Yazar/Yazarlar / Corresponding Author/Authors : \*mujdatfirat@gmail.com, altun.sehmus@gmail.com, mutluokcu@gmail.com, yvarol@gmail.com / Tel: +90 424 237 00 00 / 4375

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Dizel motorlar kara, deniz ve demiryolu gibi taşımacılık faaliyetlerinden jeneratörler ile elektrik üretimi uygulamalarına kadar çok yaygın bir alanda güç kaynağı olarak kullanılmaktadır. Dizel motorların bu yaygın kullanımının nedenleri arasında yüksek motor momenti ve düşük özgül yakıt tüketimine sahip olmaları bulunmaktadır. Ancak çevre ve insan sağlığı açısından zararlı olan  $NO_x$  ve is gibi emisyonların yüksek miktarda oluşumu bu motorlar veya bunları kullanan araçlar için önemli bir dezavantaj oluşturmaktadır. Dolayısıyla dizel motorlarından kaynaklanan bu kirletici emisyonların düşürülmesi için araştırmacılar ve motor üreticileri tarafından önemli çalışmalar yapılmaktadır. Egzoz sistemlerinin kullanımı, silindir içi yanma stratejilerinin geliştirilmesi ile alternatif yakıtların kullanılması gibi uygulamalar en yaygın yöntemler arasındadır. Günümüzde araştırmacılar egzoz sistemlerinin yüksek maliyet, bakım ve yakıt tüketimi gibi sorunlarından dolayı çoğunlukla silindir içi yanma stratejileri ile alternatif yakıt uygulamalarının araştırılmasına yönlendirilmiştir [1].

Yanma stratejileri arasında en önemlisi HCCI (Homogeneous Charge Compression Ignition), PCCI (Premixed Charge Compression Ignition) ve RCCI (Reactivity Controlled Compression Ignition) gibi uygulamaları bulunan düşük sıcaklıklı yanma stratejileridir [2]. HCCI homojen bir karışımın sıkıştırma yoluyla kendi kendine tutuşturulması esasına dayanır [3], yani buji ile ateşlemeli motorlarda olduğu gibi sıkıştırma zamanından önce hava-yakıt karışımının homojen olarak hazırlanması ve daha sonra sıkıştırma ile ateşlenmesi prensibine dayanmaktadır [4]. Sonuç olarak daha düşük  $NO_x$  ve is emisyonu ile birlikte daha yüksek ısı verime sahip olunması amaçlanmaktadır. Demirci ve Çınar [5], HCCI-DI bir motorunda ön karışım CNG kullanımında dizel yakıt kullanımına göre CO ve is emisyonlarında %90'nın üzerinde bir düşüş olduğunu ancak yanmamış HC ve  $NO_x$  emisyonlarının ise önemli bir derecede arttığını bildirmişlerdir. Aynı çalışmada termik verimin bir miktar arttığı aynı zamanda özgül yakıt tüketiminin de düştüğü rapor edilmiştir. Calam ve Aydoğan [6] ise port-enjeksiyonlu bir HCCI motorda n-heptan izopropanol katılmasının yanma başlangıcını gecikmeye aldığını ve yanma süresinin uzamasına sebep olduğunu bildirmiştir. Bununla beraber basınç artış oranının azalmasını ve böylece kendiliğinden gerçekleşen HCCI yanması kontrol altına alınmıştır. Türkcan [7] ise HCCI motorda ikinci püskürtme zamanının yanma fazlarının doğrudan kontrolüne ve yüksek yük limitlerinin genişletilebilmesine imkân verdiğini belirtmiş olmasına rağmen HCCI ile ilgili yanma üzerinde kontrol zorluğu ile dar işletme alanı ve yüksek miktarda yanmamış HC ve CO emisyonları gibi problemlerin devam etmekte olduğunu belirtmiştir. Dolayısıyla bu olumsuzluklar nedeniyle araştırmacılar HCCI ve konvansiyonel dizel yanmasının birleşimi gibi olan PCCI'ye yönelmişlerdir. Bu konseptte alev sıcaklıklarının düşük olması ve yanma odası içerisinde

zengin yakıt karışımli bölgelerin az olmasından dolayı  $NO_x$  ve is emisyonları azalmaktadır [8, 9]. Son yıllarda ise bu yukarıda bahsedilen düşük sıcaklıkta yanma stratejileri ile ilgili olumsuzlukların üstesinden gelme adına reaktivite kontrollü sıkıştırma ile ateşleme yani RCCI ileri sürülmüştür [10]. RCCI'de farklı reaktiviteye sahip en az iki yakıtın kullanılmasıyla düşük  $NO_x$  ve is emisyonları ile yüksek ısı verim korunurken yanma fazlarının daha iyi bir şekilde kontrolü amaçlanmaktadır. Konunun henüz yeni olması, konu üzerindeki araştırmaları eksik bırakmış ve konseptin pratik uygulamalara geçişini henüz mümkün kılmamıştır. RCCI'de düşük setan sayılı yani düşük reaktiviteye sahip yakıt emme zamanında bir port-enjeksiyon ile genellikle emme manifoldundan motora gönderilir. Bununla beraber yüksek setana sahip yani yüksek reaktiviteli olan ise sıkıştırma zamanında direkt-püskürtme ile motora gönderilir. RCCI çok düşük  $NO_x$  ve is emisyonları ile kabul edilebilir oranlarda basınç artış oranı ve çok yüksek indike verim ile daha geniş bir yük aralığında çalışabilir [10-12]. Nitekim Li vd. [13] HCCI ile karşılaştırıldığında optimize edilmiş ön karışım oranı ile RCCI'nin yüksek yakıt verimi, düşük ringing index ve emisyonlar ile geniş bir yük ve hız aralığında daha istikrarlı bir çalışma açısından daha umut verici bir yol olduğunu belirtmişlerdir. Benzer şekilde Dempsey ve ark. [14] yaptıkları çalışmada, HCCI, RCCI ve PCCI stratejilerinin silindir basıncı ve ısı dağılımı üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Çalışmada RCCI'nin daha uzun yanma süresine ve daha düşük basınç artış oranına sahip olduğunu tespit etmişlerdir. Bununla beraber RCCI'nin konvansiyonel dizel ile karşılaştırıldığı bazı çalışmalarda yapılmıştır. Örneğin, Curran vd. [15] RCCI'nin ısı veriminin konvansiyonel dizel yanmasına kıyasla %7 oranında gelişerek % 39'a kadar ulaştığını,  $NO_x$  emisyonlarının azalırken HC ve CO'nun arttığını belirtmişlerdir. Verim ve yakıt tüketimindeki iyileşmenin yaklaşık %10 oranında azalan ısı kayıplarından kaynaklandığı da belirtilmiştir. Daha istikrarlı RCCI ile çalışmaya ulaşmak için anahtar değişkenlerin dizel püskürtme zamanlaması ve silindir içi karışım oranı olduğunu Benajes vd. [16] belirlemişlerdir. Bunun ile ilgili yapılan bir çalışmada Nazemi ve Shahbakhti [17] RCCI bir motorda ısı salınımı ve yanma kontrolünü farklı enjeksiyon parametreleri altında incelemişlerdir. Çalışmada enjeksiyon parametreleri değiştirilerek CO ve yanmamış hidrokarbon emisyonlarının %23 ile %39 arasında azaldığını ve bu süreçte indike ve yanma veriminin arttığını gözlemişlerdir. Uyumaz ve Solmaz [18] da enjeksiyon zamanlaması ve hava fazlalık katsayısının RCCI yanması üzerinde büyük bir etkiye sahip olduğu ve dolayısıyla yanma fazının kontrol edilebileceğini belirtmişlerdir. Bununla birlikte, RCCI'nin düşük motor yüklerinde yüksek yanmamış HC ve CO emisyonları ve çok yüksek maksimum basınç yükselme oranları ile yüksek yüklerde silindir içi maksimum basınç pikleri gibi giderilmesi gereken bazı zorlukları bulunmaktadır. Bu iki sınırlama, RCCI çalışma aralığını orta dereceli yüklerle sınırlandırarak gerçek motor koşullarında uygulanmasını zorlaştırmaktadır. İçten yanmalı motorlarda petrole dayalı yakıt tüketimini ve bunların yanmasından

kaynaklanan kirletici egzoz emisyonlarını azaltmak için yukarıda da bahsedildiği gibi ileri yanma teknolojilerinden başka alternatif yakıtların kullanılması da önemli bir konu olmaktadır. Bu bağlamda dizel motorlarında kullanılan ve en çok araştırılan alternatif yakıtlar biyodizel ve biyoalkoller gibi biyoyakıtlardır [19]. Bitkisel yağlar, hayvansal ve atık pişirme/kızartma yağları ve atık kâğıtlardan elde edilen biyodizel ve petrol dizeli ile karışımları uzun bir zamandan beri dizel motorlarında yakıt olarak kullanılmaktadır [20]. Biyodizel kullanımının en önemli avantajları yenilenebilir olması, petrol dizeline yakın özellikler taşıması ile düşük kirletici oluşumuna sahip olması olarak sıralanabilir. Bununla beraber viskozitesinin yüksek olması, düşük sıcaklıktaki akış özelliklerinin kötü olması ile genellikle karşılaşılan yüksek NO<sub>x</sub> emisyonları hala çözülmesi gereken bazı eksiklikleri olarak gösterilebilir.

Önceki bölümde bahsedildiği gibi düşük sıcaklıkta yanma stratejileri arasında yakıt reaktivitesi püskürtme yönetimi sayesinde RCCI'nin daha geniş bir yük aralığına ulaşabildiğini ancak düşük yük şartlarında oluşan yüksek yanmamış HC ve CO emisyonları ile yüksek yüklerdeki basınç artış oranı ve maksimum basınçtaki yükselmeler hala RCCI için aşılması gereken bazı zorluklar olmaktadır [21]. RCCI'de yüksek ve düşük olmak üzere en az iki farklı kendi kendine tutuşma sıcaklığına sahip yakıt kullanıldığından diğer düşük sıcaklıklı yanma konseptlerine nazaran daha sıralı bir yanma sergilenmekte ve basınç gradyanının düşmesi ile çalışma aralığının genişlemesi sağlanmaktadır [21, 22]. Dolayısıyla düşük ve yüksek reaktiviteye sahip yakıtlar arasında reaktivite gradyanının geliştirilmesi amacı ile oksijen içeren alternatif yakıtların RCCI uygulamalarında kullanılması giderek önemli bir duruma gelmektedir [23, 24]. Bununla beraber yüksek yüklerdeki aşılması gereken zorluklardan biri de is emisyonlarındaki artış olmasından dolayı bu yakıtların yani oksijenli yakıtların kullanılması durumunda yüksek yüklerde meydana gelen yüksek is oluşumunun engellenmesinin daha kolay olması beklenmektedir. Nitekim biyodizel kullanarak LTC'ye daha da yaklaşılabilirliğini, HC ve CO emisyonlarının da azaltılabileceği yapılan bir çalışmada belirtilmiştir [25]. Çalışmada ayrıca fiziksel ve kimyasal özelliklerin bir takım farklılıkları nedeniyle dizel ve biyodizel yakıtlarının emisyon özelliklerinin LTC stratejilerinde farklılıklar içerdiği de rapor edilmiştir. Biyodizelin doğrudan silindir içerisine n-butanolün ise emme portuna püskürtüldüğü RCCI çalışmasında da NO<sub>x</sub> ve is emisyonlarının azaldığını ancak bunun yanında HC ve CO emisyonlarının artışının engellenemediği belirtilmiştir [26]. Öte yandan Charitha vd. [27] ise RCCI modunda biyodizelin emme manifolduna püskürtülerek motora verilmesi ile tutuşma gecikmesinin kısaldığı silindir basıncının ise yükseldiğini bununla beraber NO<sub>x</sub> ve HC emisyonlarında önemli düşüşler olduğunu bildirmişlerdir. Başka bir çalışmada da RCCI için modifiye edilmiş tek silindirli bir dizel motorunda B20 yüksek reaktiviteli, n-pentanol ise düşük reaktiviteli yakıt olarak 1500 d/dk'da ve %50 yük şartlarında kullanılmıştır. Çalışmada EGR ve çoklu püskürtmenin de etkisiyle NO<sub>x</sub> ve is emisyonlarında önemli bir derecede azalma olduğu ancak

yine de HC ve CO emisyonlarında bir artış olduğu belirtilmiştir [28]. Bilindiği gibi biyodizelin dizel motorlarında yüksek viskozitesi ve düşük ısı değeri sebebiyle direkt olarak kullanımı yerine çoğunlukla petrol kökenli dizel ile karıştırılarak kullanılmaktadır. Deneysel çalışmalarda %0'dan %100'e kadar birçok farklı karışım oranları test edilmiş olmasına rağmen pratikte belirli bazı karışım oranları tercih edilmektedir. Örneğin, Amerika Birleşik Devletleri'nde en çok kullanılan ve en popüler biyodizel yakıt karışımları B20 ve B35 iken [29], Avrupa'da, %7 biyodizel karışımı (B7) yaygın olarak kullanılmakta ve ayrıca bazı dizel araçlarının %30 biyodizel karışımı ile (B30) de kullanılabileceği bildirilmiştir [30]. Bununla beraber Avrupa Birliği'ndeki motor üreticileri tarafından yapılan testler biyodizelin petrol dizeli ile %5-10 arasında veya %25-30 ile hatta %100 oranlarındaki karışımlarının her bir kullanım türü için garanti sağlamıştır [31].

Sonuç olarak, bu çalışmada hacimsel oranda %20 biyodizel ve %80 petrol kökenli dizel yakıt karışımı yani B20 tercih edilmiştir. Böyle bir karışım oranının hem biyodizelin oksijen içeriği ve yüksek setan sayısı gibi özelliklerinin olumlu etkilerini içermesi buna karşın yüksek viskozite ve düşük ısı değeri gibi olumsuz bazı özelliklerinin etkisinin az olmasını birlikte sunması beklenmektedir. Yukarıda da bahsedildiği gibi B20 ve benzin kullanılarak RCCI şartlarında tek silindirli CRDI motorun yanma karakteristikleri konvansiyonel dizel yanma ile karşılaştırılmıştır. Bu çalışmanın amaçlarını aşağıdaki gibi özetlemek mümkündür.

- Orta-yüksek yük kademelerinde ve sabit motor hızında hem RCCI hem de konvansiyonel yanma modlarında silindir içi basınç ve ısı salınım oranı ile vuruş yoğunluğu gibi yanma parametrelerinin değişiminin incelenmesi,
- Maksimum silindir gaz basıncı ve basınç artma oranı gibi parametreler değerlendirilerek RCCI stratejisinin uygulama noktaları üzerinde değerlendirmelerin yapılmasını içermektedir.

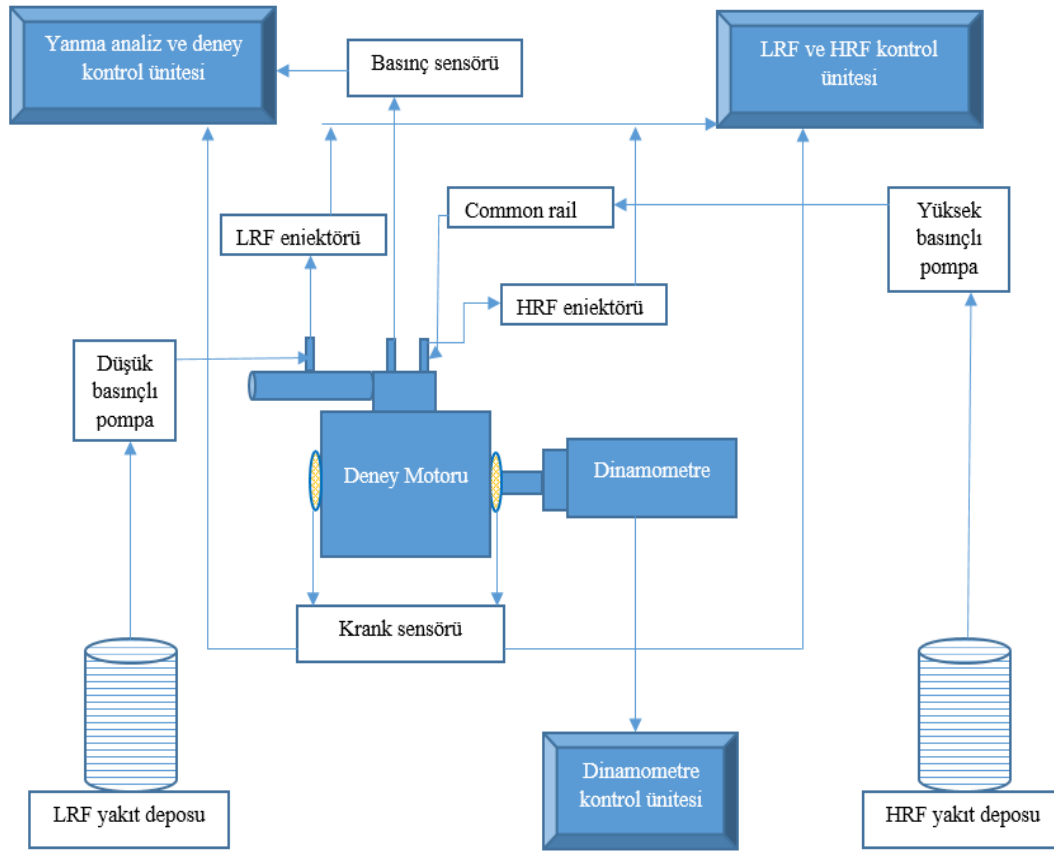
## 2. MATERYAL VE YÖNTEM (MATERIAL AND METHOD)

Deneyleri Fırat Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Otomotiv Mühendisliği Bölümü Motor Laboratuvarında bulunan deney düzeneğinde gerçekleştirilmiştir. Deneyler için tek silindirli ve dört zamanlı common-rail dizel motoru RCCI modunda çalışacak şekilde modifiye edilerek kullanılmıştır. Deneyde kullanılan motora ait özellikler Tablo 1'de verilmiştir.

Motor Gensan GSA 271 S/4 model elektrikli dinamometreye bağlanarak yükleme gerçekleştirilmiştir. Yük miktarı Zemic L6W marka yük hücresi ile ölçülmüştür. Deneyler maksimum motor torkunun %0 (yüksüz), %20, %40 ve %60'ındaki yük şartlarında ve 2400 dev/min sabit motor devrinde yapılmıştır. Her deney şartında ölçümler üç defa tekrar edilerek yapılmış ve sonuçların ortalaması alınmıştır. Deney setinin genel görünümü Şekil 1'de verilmiştir.

**Tablo 1.** Motorun teknik özellikleri (Technical characteristics of the engine)

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 dev/dak
Püskürtme Şekli	Common-Rail Direkt Püskürtme
Püskürtme Basıncı ve zamanı	300 bar @21 °KMA ÜÖNÖ
Emme supabı açılma ve kapanma zamanı	9 °KMA ÜÖNÖ/93 °KMA ÜÖNÖ
Egzoz supabı açılma ve kapanma zamanı	145 °KMA ÜÖNS/ 2 °KMA ÜÖNS
E <sub>toplam</sub> (J/çevrim)	190@Yüksüz; 310@20% yük; 440@40% yük; 590@60% yük

**Şekil 1.** Deney düzeneği şematik görünümü (Schematic view of experimental setup)

Bu çalışmada, RCCI şartlarında düşük reaktiviteli yakıt (benzin) bir port yakıt püskürtme sistemi kullanarak 0.5 MPa basınçta emme kanalına püskürtülmüştür. Püskürtme zamanlaması emme supabının açılmasından 25°KMA sonra olarak ayarlanmıştır. Yüksek reaktiviteli yakıt (B20) ise doğrudan CRDI ile ÜÖNÖ 21°KMA'da silindire püskürtülmüştür. Yakıt miktarı kontrol paneli üzerinde yer alan yakıt kontrol sistemi kullanılarak ayarlanmıştır. Yakıt tüketimi hacimsel olarak ölçeklendirilmiş yakıt deposu yardımıyla ve hassas teraziler ile doğrulaması 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 kütesel 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 biyodizel, TSE 14214'e tam uyumlu olup, atık yemeklik yağlardan elde edilmiştir ve çalışma kapsamında kullanılan biyodizel, üretim lisansı olan bir biyodizel üretici firmadan temin edilmiştir. Petrol kökenli benzin ise yine ticari olarak temin edilmiştir. Deneylerde kullanılan yakıtlara ait bazı özellikler Tablo 2'de görülmektedir.

**Tablo 2.** Yakıt Özellikleri (Properties of Used Fuels)

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
Buharlaştırma 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

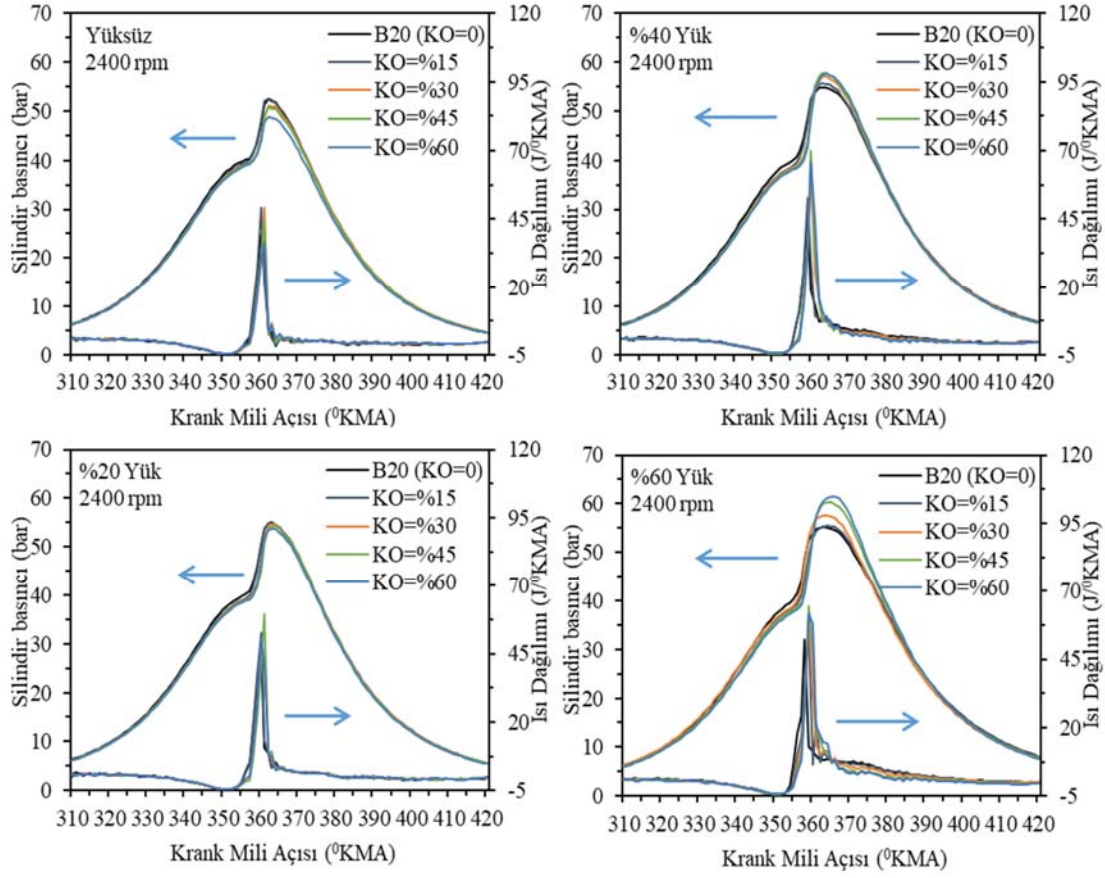
Basınç sensörü olarak Optrand marka sensör ve Kübler marka bir enkoder kullanılmıştır. Elde edilen veriler bir veri toplama kartına aktarılmış ve Febris ile analiz edilmiştir. Silindir içi gaz basıncının her bir çalışma noktası için 200 ardışık döngü üzerinden ortalaması alınmıştır. Isı salınımı, silindir içi basınç ve hacim değerleri kullanılarak termodinamiğin birinci yasası ile yazılım tarafından hesaplanmıştır. Vuruntu yoğunluğu ise ikinci türev yöntemi ile belirlenmiştir. 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 karışım oranları %0, %15, %30, %45 ve %60 olmuştur. Örneğin, %60 motor yükünde yüksek reaktiviteli yakıtın (B20) kullanımında motora 590 J/çevrim'lik bir toplam enerji verildiği belirlenmiştir. Aynı yükte %45 karışım oranı (KO) uygulaması için; geleneksel yanma modunda ve %60 yükte motora verilen 590 J/çevrim toplam enerji değerinin yüzdesel olarak %45'lik kısmının düşük reaktiviteli yakıt (benzin) ile geri kalan %55'lik kısmının da yüksek reaktiviteli yakıt ile olarak motora verilmesi işlemi yapılmıştır. Bu durumda %60 motor yükünde karışım oranının KO=%45 olduğu deneyin yapıldığı ifade edilmiştir. Bu yöntem tüm karışım oranlarının belirlenmesinde kullanılmıştır. Son olarak, yapılan çalışmada egzoz emisyonu ve duman opaklığı ölçümleri Bosch BEA 350 ve RT430 cihazları ile yapılmıştır. Emisyon cihazı ile ölçümü yapılan HC, CO ve NO<sub>x</sub> emisyonlarının hassasiyetleri sırasıyla 1 ppm, %0,1 ve 1 ppm, duman opaklığındaki hassasiyet de 0.1% seviyesindedir. Ayrıca, çalışmada elde edilen sonuçlar için belirsizlik analizi yapılmış olup, ölçülen emisyonların deneysel belirsizliği, CO, HC, duman opaklığı, ve NO emisyonu için sırasıyla, %0.74, %0.72, % 4.4 ve %0.69 olarak hesaplanmıştır.

### 3. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR (RESULTS AND DISCUSSIONS)

Şekil 2'de yüksek reaktiviteli yakıt olarak B20'nin benzinin ise düşük reaktiviteli yakıt olarak farklı karışım oranlarında ve farklı yük şartlarında kullanılması ile elde edilen silindir içi basınç ve ısı dağılımının krank mili açısına bağlı değişimleri gösterilmiştir. Burada B20 hem geleneksel dizel hem de RCCI modunda kullanılmış olup; benzin sadece RCCI şartlarında KO=%15, %30, %45 ve %60 karışım oranlarında port-püskürtme sistemi ile motora verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi %0 ve %20 motor yüklerinde karışım oranının artmasının silindir içi basıncı azalttığı, %40 yük durumunda kısmen, %60 yük durumunda ise karışım oranının artmasının silindir içi basıncı artırdığı görülmektedir.

Yüksüz ve %20 yük durumunda karışım oranına göre değişen tutuşma gecikmesinin silindir içerisinde yerel zengin karışım bölgelerinin azaltılmasına ve sonuç olarak da silindir içi basıncının azalmasına sebep olduğu düşünülmektedir. Bu yüklerde artan karışım oranının yanma sürecini çok daha etkin kontrol ettiği ve silindir içinde kendi kendine tutuşmayı engellediği düşünülmektedir. Aynı şekilde KO'nun artması ile basınç düşüşünün olduğu düşük yük şartlarında benzinin yüksek oktan sayısı ve artan karışım oranının sonucunda tutuşma gecikmesindeki uzama ile birlikte yanma reaksiyonlarının gecikmesinin daha homojen bir karışım hazırlanmasına katkı sağladığı ve yerel reaktif bölgeleri azalttığı düşünülmektedir. Tüm bunlar göz önüne alındığında, artan karışım oranının tutuşma gecikmesini uzatarak ve buna bağlı olarak yanma reaksiyonlarını geciktirdiği ve bununla silindir içi basıncının ve ısı salınım oranının düşmesine sebep olduğu düşünülmektedir.

Diğer taraftan düşük yükte oluşan bu duruma karşın kısmen %40 yük şartlarında olmak üzere özellikle %60 yük şartlarında karışım oranının artmasının silindir içi basınç oranını artırdığı yukarıda belirtilmişti. Yüksek yük şartlarında silindir içine alınan yüksek miktarda dolgu miktarı neticesinde silindir içi basıncının yükselmesi



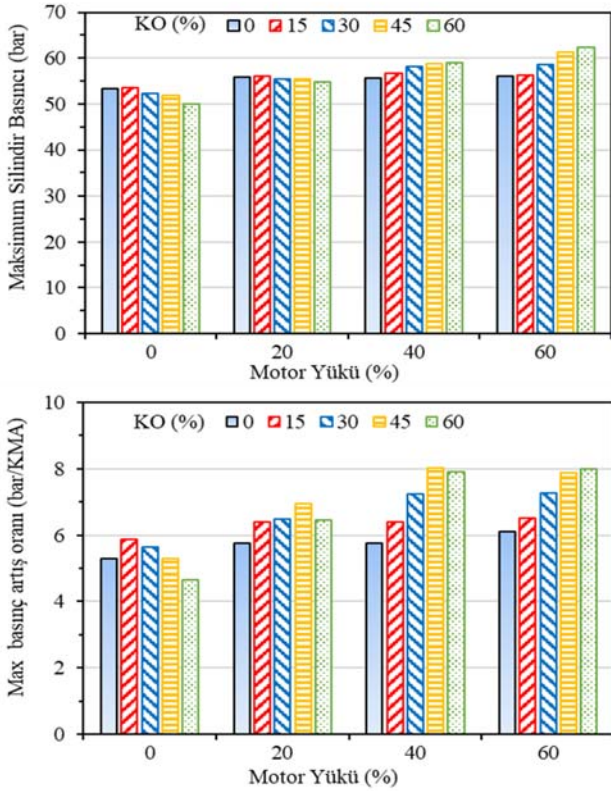
**Şekil 2.** Silindir içi basınç ve ısı dağılımının karışım oranına (KO) bağlı olarak farklı yük şartlarındaki değişimi  
(Change of in-cylinder pressure and heat release rate with load and premixing ratio)

beklenen bir durumdur. Fakat %60 yükte ani basınç ve ısı salınım oranı yükselmeleri ile yanmanın kontrolsüz olduğu görülmektedir. Bu yük için, karışım oranının artması ile silindir içinde zengin karışım bölgelerinin oluştuğu, tutuşma gecikmesinin uzaması ve yanma reaksiyonlarının hız kazanması ile basınç ve ısı salınımında ani yükselmeler olduğu söylenebilir. Bununla beraber ısı dağılımı değişimine bakıldığında karışım oranının artmasının ısı dağılımını artırdığını ancak en yüksek karışım oranı olan KO=%60 şartlarında bir düşüş olduğu gözlenmiştir. Yüksüz durumda KO=%15 karışım oranı ile yüksek ısı dağılımı elde edilirken yüklü durumlarda ise en fazla ısı dağılımı KO=%45 karışım oranı kullanımında görülmüştür. Isı salınım oranı üzerinde yine artan karışım oranının etkisi açık bir şekilde görülmektedir. Bilindiği gibi tutuşma gecikmesinin optimum olarak artması yani tutuşmanın belirli bir zaman gecikmesi hava ve yakıtın daha iyi karışmasını sağlamaktadır. Böylece daha homojen bir dolgu oluşmaktadır. Bununla beraber yüksüz durumda yanma başlangıcının karışım oranının artması ile önemli bir şekilde değişmediği ancak düşük yük şartlarında KO=%15 karışım oranı hariç diğer karışım oranları için %60 yükte ise tüm karışım oranları için bir gecikmenin olduğu görülmektedir. Özetle, benzin kullanımının silindir içi basınç ve ısı salınım oranını artırdığı, en büyük artışın KO=%60 karışım oranı kullanımı ile oluştuğu belirlenmiştir.

Sonuç olarak yüksek yük şartlarında artan karışım oranı yanma sürecini olumsuz yönde etkilemiş ve silindir içinde kontrolsüz yanmalar meydana gelmiş olduğu düşünülmektedir. Son olarak, düşük yüklerde tutuşma gecikmesini optimum seviyede tutan ve yanma sürecine olumlu katkı veren karışım oranı, yüksek yüklerde tutuşma geciktirmesini istenilen sınırlar dışında artmasına sebep olmuş ve yanma sürecini olumsuz yönde etkilemiştir.

Şekil 3'te RCCI motorda karışım oranının maksimum silindir basıncı ve maksimum basınç artışı üzerindeki etkisi farklı yükler için gösterilmiştir. Şekil incelendiğinde, tüm karışım oranları için motor yükündeki artış ile silindir basıncının pik değerleri artış göstermiştir. Bununla beraber yüksek yüklerdeki pik silindir basıncındaki artış düşük yüklerle oranla daha fazla olmuştur. Öte yandan KO'nun artması ile pik basıncın artışı farklı yük kademelerinde farklı olmuştur. Örneğin, yüksüz durumda KO'daki artış ile pik basınç değerlerinde bir miktar düşüş gözlemlenirken; %20 yük şartlarında ise çok önemli bir değişim olmamıştır. Ancak %40 ve %60 gibi daha yüksek yük şartlarında pik basınç değerleri karışım oranının (KO) artmasıyla daha da artmıştır. Basınçta %40 yükte en fazla artış %60 KO kullanımında yaklaşık olarak %6 oranında gerçekleşirken, %60 yükte en fazla artış yine %60 KO kullanımında yaklaşık olarak %11 oranında gerçekleşmiştir.

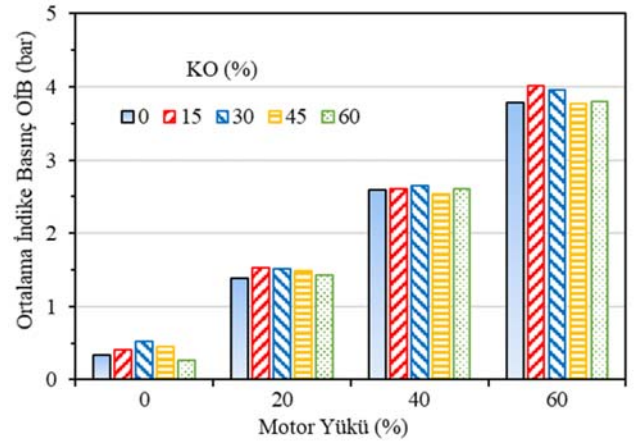
Diğer taraftan yine Şekil 3'te maksimum basınç artış oranı değerlerine bakıldığında pik basınç değerlerinde olduğu gibi yükteki artış ile arttığı görülmektedir. Ancak %40 ve %60 yük şartlarında geleneksel dizel yanma modunda B20 (KO=0) kullanımı ile maksimum basınç artış oranında bir miktar artış gerçekleşmesinin yanında diğer karışım oranları için önemli bir değişim olmadığı gözlemlenmiştir. Bununla beraber yüksüz durumda RCCI şartlarında KO'nun artması ile maksimum basınç artış oranı azalmıştır. %20 yükte ise KO=%60 durumunda bir düşüş olduğu görülmektedir. En yüksek maksimum basınç artış oranı %40 yükte 8 bar/KMA ile KO=45 durumunda; en düşük ise %0 yükte 4,66 bar/KMA ile KO=60 ile elde edilmiştir.



**Şekil 3.** Maksimum silindir basıncı ve basınç artış oranı değerlerinin karışım oranına (KO) bağlı olarak farklı motor yüklerindeki değişimi  
(Change of max. pressure and rate of pressure rise in cylinder with load and premixing ratio)

Şekil 4 RCCI motorda farklı motor yüklerinde karışım oranının OİB değeri üzerine olan etkisini grafiksel olarak göstermektedir. Motor yükü ve karışım oranı arttıkça içeriye alınan dolgu artmış buna bağlı olarak da OİB değerinin arttığı belirlenmiştir. Karışım oranının artmasının tüm yük şartlarında genel olarak OİB değerlerinde bir artış sağladığı tespit edilmiştir. OİB değeri genel olarak silindir içerindeki enerji miktarı ve bu enerjinin hangi krank açısında ortaya çıktığına doğrudan bağlı bir parametredir. Motora uygulanan yük arttıkça silindir içine alınan dolgu miktarı ve buna bağlı olarak da enerji miktarı artmaktadır. Ayrıca Pan ve arkadaşlarının da bildirdiği gibi, OİB değerinin

belirlenmesin de önemli bir başka parametre de silindirde oluşan maksimum basınç noktasının hangi krank açısında oluştuğudur [32]. Bu parametreyi de göz önüne aldığımız zaman özellikle düşük yüklerde tutuşma gecikmesinin kısmi uzaması maksimum basınç noktasının ÜÖN'ya uzaklığını belirlemiştir. Tüm bu veriler göz önüne alındığında, OİB değerinin %15 ve %30 KO kullanımında tüm yüklerde arttığı belirlenmiştir. Ayrıca %40 ve %60 yük deneylerinde KO ile uzayan tutuşma gecikmesi yanma reaksiyonlarının ÜÖN'dan bir miktar ötelenmesine sebep olmuş ve özellikle %45 KO oranında OİB verisinde kısmi bir azalma olduğu görülmüştür. Bu azalmaya rağmen, genel olarak OİB değerini RCCI etkisi ile büyük oranda artış yönünde eğilimler olduğu görülmüş, bununda RCCI adına önemli olduğu değerlendirilmiştir. Tüm veriler incelendiğinde OİB değerinde en büyük artış %0 yükte %30 KO kullanımında %56 oranında gerçekleşirken, en büyük azalmanın da yine %0 yükte %60 KO kullanımında %20 oranında gerçekleştiği tespit edilmiştir.



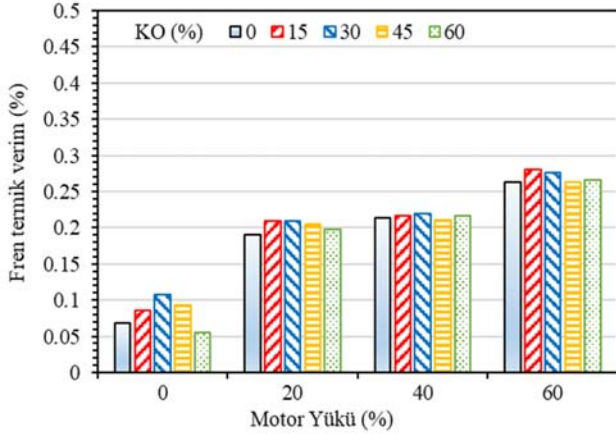
**Şekil 4.** Ortalama indike basıncın (OİB) karışım oranına (KO) bağlı olarak farklı motor yüklerindeki değişimi  
(Change of IMEP with load and premixing ratio)

Şekil 5'te RCCI motorda farklı motor yüklerinde karışım oranının fren termik verimi değeri üzerine olan etkisini grafiksel olarak göstermektedir. Veriler incelendiğinde, %0 yükte fren termik verim üzerinde RCCI etkisinin diğer yüklerle göre daha fazla olduğu belirlenmiştir. Tüm deneyler arasında termik verimdeki en büyük artış ve azalış bu yükte meydana gelmiştir. En büyük artış %0 yükte %30 karışım oranı kullanımında %57 oranında gerçekleşirken, en büyük azalma yine %0 yükte ve %60 karışım oranı kullanımında %19 oranında gerçekleşmiştir. Motor yükü arttıkça termik verim üzerindeki RCCI'nin olumlu etkisi devam etmiş ve verim değerinde azalma meydana gelmemiştir. Ayrıca, tüm yük deneylerinde %15 ve %30 karışım oranı kullanımının termik verim değerinin gelenekse dizele oranla artırdığı belirlenmiştir.

Şekil 6'da değişen motor yüklerinde B20 ve benzinin farklı oranlarda kullanıldığı RCCI konseptinin vuruntu yoğunluğu üzerine olan etkisinin incelendiği deneysel çalışma sonuçları sunulmuştur. Veriler incelendiğinde, %0 ve %20 yükte KO



artmasının vuruntu yoğunluğunu azaltıcı etkisinin olduğu, buna karşın %40 ve %60 yüklerde karışım oranının artmasına paralel olarak vuruntu yoğunluğunun da arttığı tespit edilmiştir. Dizel motorlarda vuruntunun temel sebebinin yanma sürecinin kontrol edilmemesi ve yanma sürecinin aniden başlamasının olduğu bilinmektedir. Vuruntu grafiği incelendiğinde, %0 ve %20 yük durumlarında yanma sürecinin kontrol edildiği, %40-60 yüklerde ise kontrolsüz yanmanın arttığı görülmektedir. Bu sonuç basınç ve ısı salınım oranı verileri ile de uyumludur. %0-20 yüklerde KO artması ile homojenlik sağlanmış, silindir içi zengin karışım bölgeleri azaltılmış ve tutuşma gecikmesi optimum olarak kontrol edilmiştir. Bu durum yanma sürecini kontrol etmiş ve vuruntu yoğunluğunu azaltmıştır. %40-60 yük durumunda ise KO arttıkça silindir içi zengin karışım bölgeleri artmış, dolgu homojenliği kaybolmuş ve tutuşma gecikmesi biraz daha uzamıştır. Bu şartlar altında başlayan yanma süreci neticesinde vuruntu yoğunluğunda artış meydana gelmiştir. Özetle, RCCI konsepti kullanımının ilk iki yükte yanmayı kontrol ettiği, fakat %40-60 yüklerde ise yanma sürecinin kontrolünde olumsuz bir etken olduğu görülmüştür. Ayrıca, düşük yüklerde karışım oranının artmasının vuruntu yoğunluğunu azaltması önceki grafiklerle de uyumlu olmakla birlikte RCCI adına da umut verici bir sonuç olduğu düşünülmektedir.



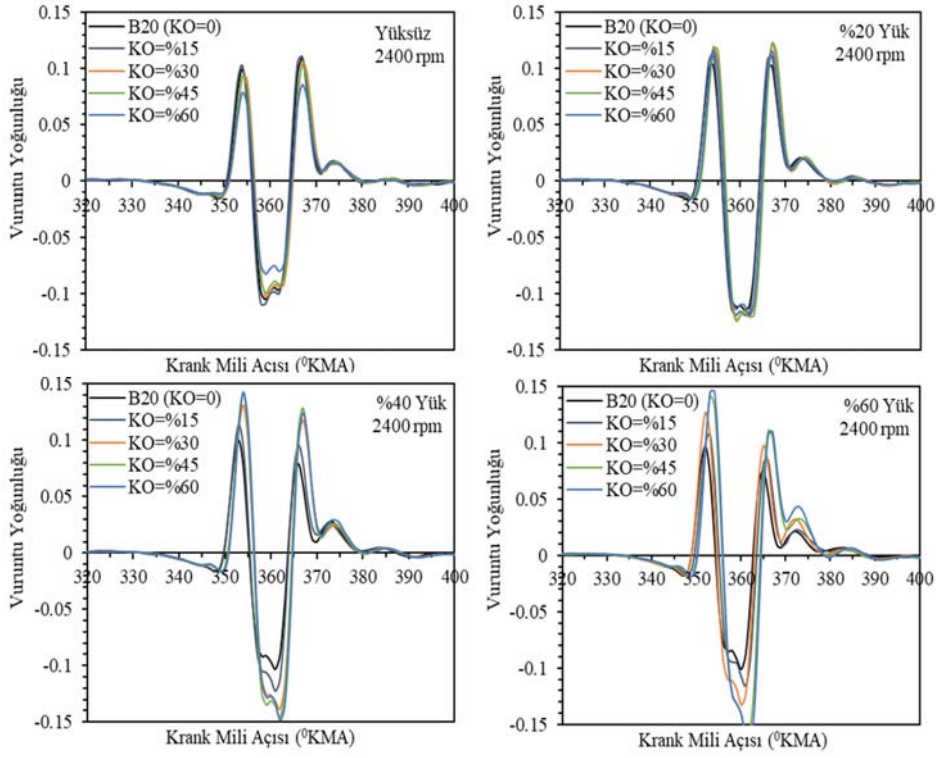
**Şekil 5.** Fren termik veriminin karışım oranına (KO) bağlı olarak farklı motor yüklerindeki değişimi  
(Change of brake thermal efficiency with load and premixing ratio)

Şekil 7’de RCCI konseptli motorda karışım oranı değişiminin farklı yükler altında silindir içi gaz sıcaklığı üzerinde oluşturduğu değişimi gösteren grafiksel veriler sunulmuştur. Veriler incelendiğinde, %0 ve %20 motor yük deneylerinde karışım oranının artmasının B20’ye kıyasla silindir içi sıcaklık değerini azalttığı görülmektedir. Düşük yüklerde artan karışım oranı ile birlikte silindir içerisine alınan dolgu daha homojen bir yapıya dönüşmüştür. Böylece yerel zengin karışım bölgeleri azaltılmış olur. Daha fakir bir karışım ile tutuşma gecikmesi kontrollü olarak uzatılmış ve silindir içinde düşük sıcaklıklı yanma reaksiyonları meydana gelmiştir. Geciktirilen yanma sürecinin sonucunda silindir içindeki sıcaklık değeri baskılanarak artan karışım oranına

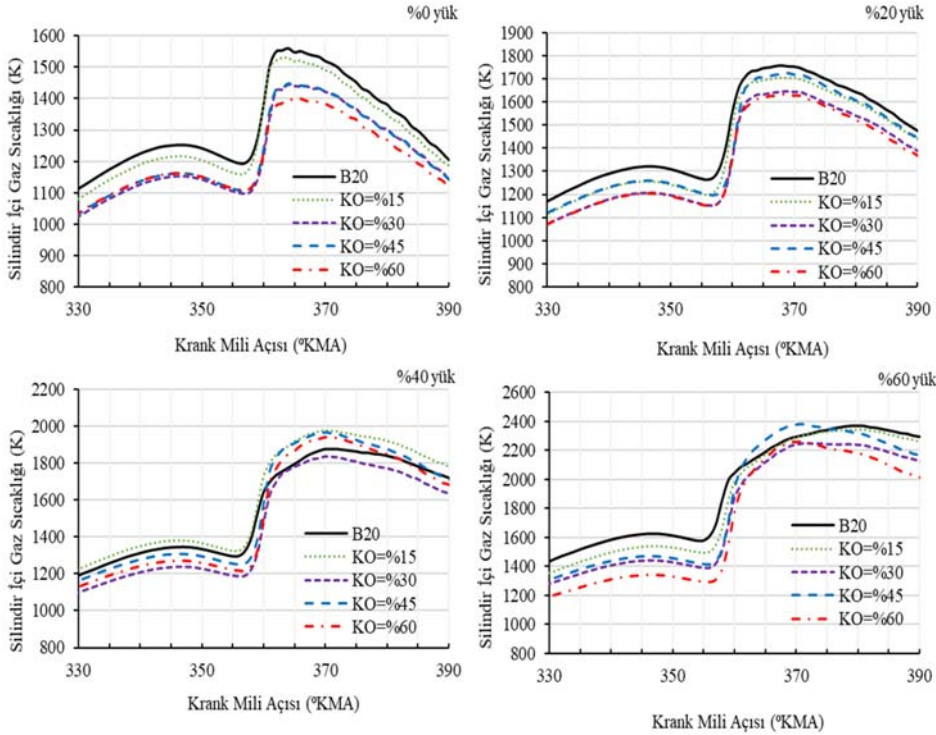
bağlı olarak azalmış olur. %40 ve %60 yüklerde ise sabit enerji ilkesi gereği artan karışım oranı silindire daha fazla miktarda dolgu girmesine sebep olmuştur. Silindirde daha fazla miktarda bulunan dolgu, sıkıştırma zamanı sonuna doğru silindir içinde farklı noktalarda hem zengin karışım bölgeleri hem de soğuk bölgeler oluşturmuş ve özellikle cidarlarda sıcaklığı azaltmıştır. Artan dolgu miktarı ve silindirde oluşan zengin hava/yakıt karışımı nedeniyle yanma reaksiyon sıcaklığı aniden yükselmiş fakat yanma kontrolsüzlüğü nedeniyle ani düşüşlere maruz kalmıştır. %40 motor yükünde karışım oranının artması ve yanmanın başlamasıyla birlikte B20’ye göre daha yüksek sıcaklık değerlerine ulaşılmıştır. Benzer sonuç %60 yük durumunda da görülmüştür. Ancak %60 yükte %40 yüke göre RCCI etkisinin daha fazla olduğu ve silindir sıcaklığını azaltmada daha etkin olduğu tespit edilmiştir. Tüm veriler göz önüne alındığında, %0 ve %20 yükte RCCI etkisi ile sıcaklık değerinin kontrollü olarak azaldığı, %40 ve %60 yükte ise diğer yüklerle göre artış/azalış değişiminin daha kontrolsüz olduğu belirlenmiştir. %40 ve %60 motor yüklerinde sıcaklığın uzayan tutuşma gecikmesi ile aniden başladığı ve azaldığı gözlenmiştir.

Şekil 8’de RCCI konseptli motorda karışım oranı değişiminin farklı yükler altında CO emisyonu üzerinde oluşturduğu değişimi gösteren grafiksel veriler sunulmuştur. Veriler incelendiğinde, %40 motor yüküne kadar karışım oranının artmasının CO emisyonunu artırdığı, %60 yükte ise azalttığı belirlenmiştir. CO emisyonları birden çok sebep dolayısıyla ortaya çıkan yanma ürünleridir. Yapılan bu çalışmada, %60 yük dışında tüm yüklerde silindir içerindeki sıcaklığın artan karışım oranıyla birlikte düşmesinin daha az oksitlenmeye sebep olduğu ve bunun bir sonucu olarak da CO oranını artırdığı düşünülmektedir [33, 34]. Düşük yanma sıcaklığı CO oranlarının artmasına sebep olmuştur. %60 yükte ise, CO emisyonunun karışım oranı artışına karşılık azaldığı görülmüştür. Bu durum yanma sıcaklığına bağlı olduğu düşünülmektedir. Bilindiği gibi CO genel olarak zengin karışım dolayısıyla ve eksik yanma ürünü olarak oluşan bir gazdır. %60 yük durumunda silindir içerisindeki dolgu miktarı artmıştır ve hava/yakıt oranı azalmış yani zengin karışım bölgeleri oluşmuştur. Buna bağlı olarak silindir içi sıcaklıkları da aniden artmış daha sonra azalmıştır. Artan yerel zengin karışım bölgesi sebebiyle CO oranı artmıştır. Sonuç olarak, çalışmada oluşan CO emisyon seviyesinin, dolgu sıcaklığı ve yanma süreci sürenine doğrudan bağlı olduğu tespit edilmiştir.

Şekil 9’da değişen motor yüklerinde B20 ve benzinin farklı oranlarda kullanıldığı RCCI konseptinin yanmamış HC emisyonu üzerine olan etkisinin incelendiği deneysel çalışma sonuçları sunulmuştur. HC emisyonları incelendiğinde, artan karışım oranının tüm yüklerde HC emisyon değerinin kademeli olarak artırdığı görülmektedir. HC emisyonunun arttığı yüklerde düşük yanma sıcaklığı ve silindir içinde oluşan homojen dolgu neticesinde yerel zengin karışım bölgelerinin engellenmesi birlikte değerlendirilmesi gereken bir durumdur. Silindir sıcaklığı LRF oranı ile birlikte azalanınca, yanmayan yakıt



Şekil 6. Vuruntu yoğunluğunun karışım oranına (KO) bağlı olarak farklı motor yüklerindeki değişimi (Change of knock density with load and premixing ratio)

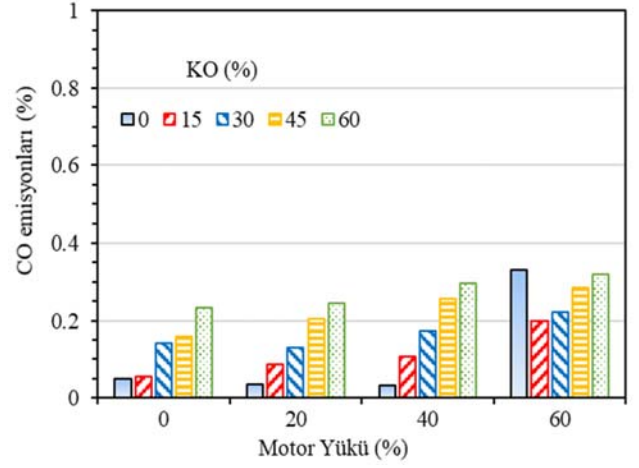


Şekil 7. Silindir içi gaz sıcaklığının karışım oranına (KO) bağlı olarak farklı motor yüklerindeki değişimi (Change of in-cylinder gas temperature with load and premixing ratio)

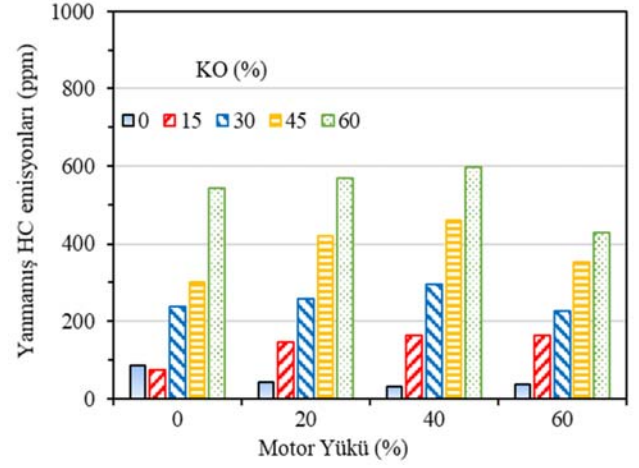
parçacıkları ortam şartlarına bağlı olarak CO, duman ya da HC emisyonuna dönüşerek silindirden atılmıştır. Ayrıca

RCCI doğası gereği emme zamanında püskürtülen yakıtın bir miktar silindir cidarlarında birikmesinin de kısmi olsa da

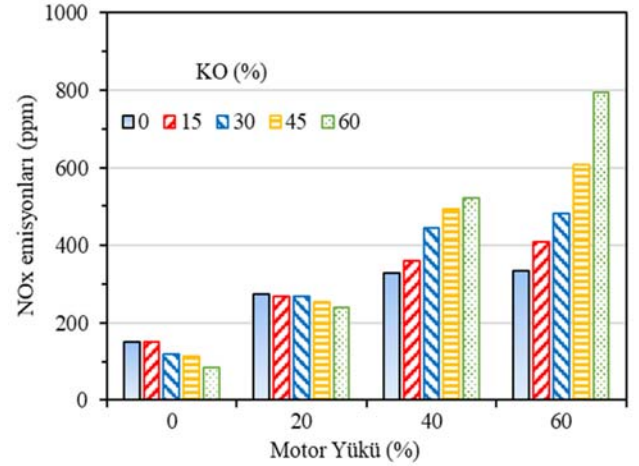
HC artışına sebep olduğu düşünülmektedir. Bu durumun Yao ve arkadaşları tarafından iletilen sonuçlarla örtüştüğü görülmüştür [35]. %60 yük durumunda da HC emisyonu oranını arttırmıştır. Fakat burada artış hızının yavaşladığı ve diğer yüklerden daha az HC emisyonu oluştuğu gözlenmiştir. Bu yük durumunda yanma kontrolsüz gerçekleşmiş olsa da silindir içi sıcaklık değerlerinin aniden artmasını sağlamıştır. Diğer yük durumlarına kıyasla yakıt parçacıklarının reaksiyona girmeleri artan sıcaklıkla beraber hızlanmış ve daha az HC oluşmuştur. Buna karşın bu yük için artan LRF oranının HC emisyonlarını yine de artırdığı görülmüştür. Bunun sebebinin emme zamanında püskürtülen yakıtın silindir cidarlarında kısmında birikmesi ve mevcut yanma reaksiyonlarının sıcaklığının LRF oranı ile azalması sonucu reaksiyona katılmayan yakıt parçacıkları olduğu düşünülmektedir. Şekil 10'da farklı motor yüklerinde ve karışım oranlarında  $NO_x$  emisyonu üzerine karışım oranı (KO) artışının etkisi ile değişimi gösterilmiştir.  $NO_x$  emisyonu literatürde genel olarak silindir içi sıcaklık, dolgu içerisindeki oksijen yoğunluğu ve maksimum sıcaklıkta kalma sürelerine doğrudan bağlı bir yanma ürünü olarak bilinmektedir [36-38]. Çalışmada %0 ve %20 yük durumunda karışım oranının artmasının  $NO_x$  emisyonunu kademeli olarak azalttığı, buna karşın %40-%60 yüklü durumda ise tüm karışım oranlarının ise  $NO_x$  emisyonunu artırdığı görülmüştür. Düşük yüklerde karışım oranının artması ile silindir içi sıcaklık değerinin düşük olması sebebi ile  $NO_x$  oluşum mekanizması için gerekli sıcaklık değerlerine ulaşamamıştır. %40 ve %60 yük durumlarda ise silindir içi sıcaklığın yanma süreci sonunda azalmasına rağmen sürecin başında aniden yükselmesi doğrudan  $NO_x$  oluşumunu etkilemiş ve bu yüklerde karışım oranı artışı bu emisyonu artırıcı bir etkiye bulunmuştur. Özetle, %0 ve %20 yüklerde, RCCI etkisi ile  $NO_x$  emisyonunda azalma sağlandığı, ancak motor yükü artması ile artışlar olduğu belirlenmiştir. Şekil 11'de RCCI konseptli motorda karışım oranı değişiminin farklı yükler altında duman koyuluğu üzerinde oluşturduğu değişimi gösteren grafiksel veriler sunulmuştur. Grafikler incelendiğinde, RCCI konsepti uygulamasının tüm yük ve tüm karışım oranlarında B20'ye kıyasla duman koyuluğunda azalmaya sebep olduğu görülmüştür. Bu azalma özellikle %60 yük durumunda oldukça fazla olmuş ve duman koyuluğunun seviyesi oldukça düşmüştür. Duman koyuluğu genel olarak yanmamış karbon parçacıklarını ifade eden bir emisyon türü olarak bilinmektedir. Tüm emisyon grafikleri incelendiğinde, ön karışimli benzin kullanımında (RCCI şartlarında) CO ve HC emisyon değerlerinin B20'ye kıyasla arttığı görülmektedir. Yanma reaksiyonlarına katılan karbon parçacıklarının ortam ve yanma şartlarına bağlı olarak egzozdan CO veya yanmamış HC olarak atıldığı düşünülmektedir [39]. Bu durumun RCCI deneylerinde duman koyuluğunu oluşturacak karbon miktarını oldukça azalttığı tespit edilmiştir. Sonuç olarak, %0 ve %20 yükte RCCI etkisinin duman koyuluğu azaltmadaki etkisinin az olduğu, yük arttıkça RCCI etkisinin de arttığı ve duman koyuluğunun önemli oranda azaldığı belirlenmiştir. Özellikle %60 yük durumunda %60 karışım oranı kullanımı ile duman koyuluğunun %96 oranında azaldığı tespit edilmiştir.



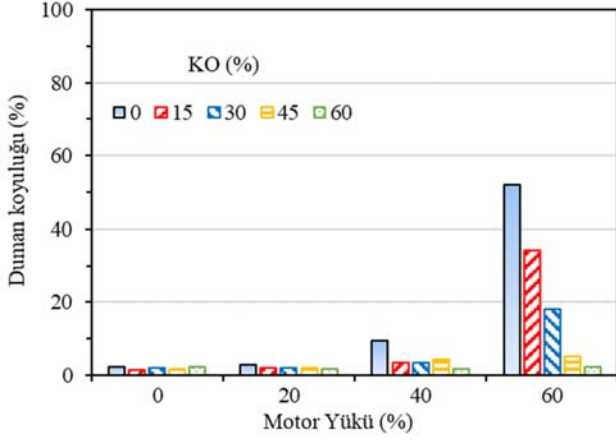
Şekil 8. CO emisyonunun karışım oranına (KO) bağlı olarak farklı motor yüklerindeki değişimi (Change of CO emissions with load and premixing ratio)



Şekil 9. Yanmamış HC emisyonunun karışım oranına (KO) bağlı olarak farklı motor yüklerindeki değişimi (Change of HC emissions with load and premixing ratio)



Şekil 10.  $NO_x$  emisyonunun karışım oranına (KO) bağlı olarak farklı motor yüklerindeki değişimi (Change of  $NO_x$  emissions with load and premixing ratio)



**Şekil 11.** Duman koyuluğunun karışım oranına (KO) bağlı olarak farklı motor yüklerindeki değişimi  
(Change of Smoke opacity with load and premixing ratio)

#### 4. SONUÇLAR (CONCLUSION)

Bu çalışmada, yüksek reaktiviteli yakıt olarak hacimsel oranlarda %20 biyodizel ve %80 petrol dizelinden oluşan B20 karışımı düşük reaktiviteli olarak ta benzin kullanılan tek silindirli bir RCCI motorda yanma karakteristikleri ile egzoz emisyonları üzerinde ön karışım oranı (KO) ve motor yükünün etkisi araştırılmıştır. Yapılan deneysel çalışmaların sonuçlarını aşağıdaki gibi özetlemek mümkündür.

- Düşük reaktiviteli yakıt kullanımının %0 yük dışındaki diğer yüklerde silindir içi basınç ve ısı salınım oranını artırdığı, ısı salınımında en büyük artışın %40 yükte ve %45 karışım oranı kullanımı ile yaklaşık %50 oranında gerçekleştiği belirlenmiştir. Basıncıdaki en büyük artış ise %60 yük ve %60 karışım oranı kullanımında %11 olarak gerçekleşmiştir.
- RCCI konseptli motorda karışım oranının %15 ve 30 olduğu tüm yüklerde OİB'nin arttığı belirlenmiştir. OİB'deki en büyük artış %0 yükte %30 KO kullanımında %56 oranında gerçekleşirken, en büyük azalmanın da yine %0 yükte %60 KO kullanımında %20 oranında gerçekleştiği tespit edilmiştir.
- RCCI uygulaması ile tüm deneylerde %15 ve %30 karışım oranı kullanımının termik verim değerinin geleneksel dizel yanmasına oranla artırdığı belirlenmiştir.
- %0 ve %20 yükte karışım oranı arttıkça vuruntu yoğunluğunun azalma yönünde eğilim gösterdiği, %40 ve %60 yükte ise vuruntu yoğunluğunun arttığı belirlenmiştir.
- %0 ve %20 yük durumunda karışım oranının artmasının NO<sub>x</sub> emisyonunu kademeli olarak azalttığı, buna karşın %40-%60 yüklü durumunda ise tüm karışım oranlarında NO<sub>x</sub> emisyonunu artırdığı görülmüştür.
- RCCI konseptinin tüm deneylerde B20'ye kıyasla duman koyuluğunda azalmaya sebep olduğu görülmüştür. %0 ve %20 yükte RCCI etkisinin duman koyuluğu azaltmadaki etkisinin az olduğu, yük arttıkça RCCI etkisinin de arttığı ve duman koyuluğunun %60 yük ve %60 karışım oranında %96 gibi yüksek bir oranda azaldığı tespit edilmiştir.

- %40 motor yüküne kadar karışım oranının artmasının CO emisyonunu artırdığı, %60 yükte ise azalttığı belirlenmiştir. Artan karışım oranının tüm yüklerde HC emisyonunu kademeli olarak artırdığı görülmüştür.

Sonuç olarak, B20 yakıtlı geleneksel dizel motora uygulanan RCCI konsepti ile düşük yüklerde (%0 ve %20 yük) silindir içi basınç değerinin azaldığı ve bu azalmaya rağmen düşük reaktiviteli yakıtın tutuşma gecikmesini uzatmasının motor performansında bir azalma olmasını engellediği ve tüm deneylerde %15 ve %30 karışım oranı kullanımının termik verim değerinin geleneksel dizele oranla artırdığı belirlenmiştir. Bu durumun RCCI konsepti adına önemli bir sonuç olduğu düşünülmektedir.

#### 5. SİMGELER (SYMBOLS)

CO <sub>2</sub>	: Karbondioksit
HC	: Hidrokarbon
HRF	: Yüksek reaktiviteli yakıt
LRF	: Düşük reaktiviteli yakıt
KMA	: Krank mili açısı
NO <sub>x</sub>	: Azot oksit
ÜÖNÖ	: Üst ölü noktadan önce
ÜÖNS	: Üst ölü noktadan sonra

#### TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Bu çalışma, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Projelerini Destekleme Programı kapsamında 118M650 numaralı projesi ile desteklenmiştir. Yazarlar, sağladığı destekten dolayı TÜBİTAK'a teşekkür eder.

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Lapuerta M., Hernández J.J., Oliva F., Strategies for active diesel particulate filter regeneration based on late injection and exhaust recirculation with different fuels, *International Journal of Engine Research*, 15 (2), 209–21, 2014.
2. 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*, 116, 109404, 2019.
3. Dönmez A.F., Homojen karışimli sıkıştırma ateşlemeli bir motorun (HCCI) tek bölgesi modelleme yöntemi kullanılarak analizi, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, 2010.
4. Calam A., Solmaz H., Yılmaz E., İçingür Y., Investigation of effect of compression ratio on combustion and exhaust emissions in A HCCI engine, *Energy*, 168, 1208-1216, 2019.
5. Demirci O.K., Çınar C., HCCI-DI bir motorda doğal gaz kullanımının performans ve egzoz emisyonlarına etkisinin incelenmesi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*, 7 (2), 317–330, 2019.

6. Calam A., Aydoğan B., İzopropanol ve heptan karışım yakıtları kullanımının bir HCCI motorda performans yanma ve emisyon karakteristiklerinin deneysel incelenmesi. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*, 7 (4), 818–833, 2019.
7. Türkcan A., Direkt püskürtmeli HCCI bir motorda püskürtme parametrelerinin yanma ve emisyon karakteristiklerine etkisinin incelenmesi. *Doktora Tezi*, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 2013.
8. Manente V., Tunestal P., Johansson B., Cannella W., Effects of ethanol and different type of gasoline fuels on partially premixed combustion from low to high load, *SAE Technical Paper 2010-01-0871*, 2010.
9. Srihari S., Thirumalini S., Investigation on reduction of emission in PCCI-DI engine with biofuel blends. *Renewable Energy*, 114, 1232–1237, 2017.
10. Kokjohn S.L., Hanson R.M., Splitter D.A., Reitz R.D., Fuel reactivity controlled compression ignition (RCCI): A pathway to controlled high-efficiency clean combustion, *Int. J. Engine Res.*, 12 (3), 209–226, 2011.
11. Li J., Yang W., Zhou D., Review on the management of RCCI engines, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 69, 65–79, 2017.
12. Kokjohn S.L., Reitz R.D., Reactivity controlled compression ignition and conventional diesel combustion: A comparison of methods to meet light-duty NOx and fuel economy targets, *Int. J. Engine Res.*, 14 (5), 452–468, 2013.
13. Li Y., Jia M., Chang Y., Xie M., Reitz R.D., Towards a comprehensive understanding of the influence of fuel properties on the combustion characteristics of a RCCI (reactivity controlled compression ignition) engine, *Energy*, 99, 69–82, 2016.
14. Dempsey A.B., Walker N.R., Gingrich E., Reitz R.D., Comparison of low temperature combustion strategies for advanced compression ignition engines with a focus on controllability, *Combustion Science and Technology*, 186 (2), 210–241, 2014.
15. Curran S.J., Hanson R.M., Wagner R.M., Reactivity controlled compression ignition combustion on a multi-cylinder light-duty diesel engine, *Int. J. Engine Res.*, 13 (3), 216–225, 2012.
16. Benajes J., Pastor J.V., García A., Monsalve-Serrano J., The potential of RCCI concept to meet EURO VI NOx limitation and ultra-low soot emissions in a heavy-duty engine over the whole engine map, *Fuel*, 159, 952–961, 2015.
17. Nazemi M., Shahbakhti M., Modeling and analysis of fuel injection parameters for combustion and performance of an RCCI engine, *Applied Energy*, 165, 135–150, 2016.
18. 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*, 4 (4), 299–308, 2016.
19. Turkcan A., Effects of high bioethanol proportion in the biodiesel-diesel blends in a CRDI engine, *Fuel*, 223, 53–62, 2018.
20. Keskin A., Gürü M., Altıparmak D., Investigation of 90% blend of tall oil biodiesel fuel with diesel fuel as alternative diesel fuel, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 22 (1), 57–63, 2007.
21. Benajes J., García A., Monsalve-Serrano J., Sari R.L., 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*, 157, 19–30, 2018.
22. Yang Y., Dec J.E., Dronniou N., Sjöberg M., Tailoring HCCI heat-release rates with partial fuel stratification: Comparison of two-stage and single-stage-ignition fuels, *Proceedings of the Combustion Institute*, 33 (2), 3047–3055, 2011.
23. Li J., Yang W.M., An H., Zhao D., Effects of fuel ratio and injection timing on gasoline/biodiesel fueled RCCI engine: A modeling study, *Applied Energy*, 155, 59–67, 2015.
24. Zheng Z., Xia M., Liu H., Wang X., Yao M., Experimental study on combustion and emissions of dual fuel RCCI mode fueled with biodiesel/n-butanol, biodiesel/2,5-dimethylfuran and biodiesel/ethanol, *Energy*, 148, 824–838, 2018.
25. Imtenan S., Varman M., Masjuki H.H., Kalam M.A., Sajjad H., Arbab M.I., Rizwanul Fattah I.M., Impact of low temperature combustion attaining strategies on diesel engine emissions for diesel and biodiesels: A review, *Energy Conversion and Management Energy*, 80, 329–356, 2014.
26. Liu H., Wang X., Zheng Z., Gu J., Wang H., Yao M., Experimental and simulation investigation of the combustion characteristics and emissions using n-butanol/biodiesel dual-fuel injection on a diesel engine, *Energy*, 74, 741–752, 2014.
27. Charitha V., Thirumalini S., Prasad M., Srihari S., Investigation on performance and emissions of RCCI dual fuel combustion on diesel-bio diesel in a light duty engine, *Renew. Energy*, 134, 1081–1088, 2019.
28. Sabu V.R., Thomas J.J., Nagarajan G., Experimental investigation on the effects of multiple injections and EGR on n -pentanol-biodiesel fuelled RCCI engine, *RSC Advances*, 10 (49), 29498–29509, 2020.
29. Wang W.G., Lyons D.W., Clark N.N., Gautam M., Norton P.M., Emissions from nine heavy trucks fueled by diesel and biodiesel blend without engine modification, *Environ. Sci. Technol.* 34 (6), 933–939, 2000.
30. Kampman B., Verbeek R., Grinsven A.V., Mensch P.V., Croezen H., Patuleia A., Bringing biofuels on the market Options to increase EU biofuels volumes beyond the current blending limits, 13.4567.46, Delft, CE Delft, July 2013.
31. European Biodiesel Board. <https://www.ebb-eu.org/biodiesel.php>. Yayın tarihi Ocak 12, 2021. Erişim tarihi Şubat 11, 2021.
32. Pan S., Liu X., Cai K., Li X., Han W., Li B., Experimental study on combustion and emission characteristics of isobutanol/ diesel and gasoline/diesel

- RCCI in a heavy-duty engine under low loads, *Fuel*, 261, 116434, 2020.
33. Ahmed S.A., Zhou S., Zhu Y., Feng Y., Performance and Emission Characteristics Analysis of Dual Fuel Compression Ignition Engine Using Natural Gas and Diesel, *International Journal of Thermodynamics*, 21 (1), 16-25, 2018.
  34. Abdelaal M.M., Rabee B.A., Hegab A.H., Effect of adding oxygen to the intake air on a dual-fuel engine performance, emissions, and knock tendency, *Energy*. 61, 612-620, 2013.
  35. 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*, 85 (14-15), 2046-2056, 2006.
  36. Ghareghani A., Hosseini R., Mirsalim M., Jazayeri S.A., Yusa T., An experimental study on reactivity controlled compression ignition engine fueled with biodiesel/natural gas, *Energy*, 89, 558-567, 2015.
  37. Kannan S., Mahalingam S., Srinath S., Sivasankaran M., Kannan S., An experimental study in HCCI combustion of LPG in diesel engine, *Materials Today: Proceedings*. 37, 3625-3629, 2021.
  38. Carlucci A.P., Risi A. de, Laforgia D., Naccarato F., Experimental investigation and combustion analysis of a direct injection dual-fuel diesel-natural gas engine, *Energy*. 33 (2), 256-263, 2008.
  39. Zehni A., Saray R.K., Poorghasemi K., Numerical comparison of PCCI combustion and emission of diesel and biodiesel fuels at low load conditions using 3D-CFD models coupled with chemical kinetics, *Applied Thermal Engineering*, 110, 1483-1499, 2017.