

FARKLI ORANLARDA İZOOKTAN-DİZEL YAKITI İLE BESLENEN BİR RCCI MOTORUNUN MOTOR PERFORMANSI VE EMİSYONLARI ÜZERİNE DENEYSEL BİR ÇALIŞMA

Müjdat FIRAT¹, Mutlu OKCU^{2*}, Yasin VAROL³

^{1,3}Fırat Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Otomotiv Mühendisliği Bölümü, Elazığ, 23000, Türkiye

²Ardahan Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Ardahan, 75002, Türkiye

Geliş Tarihi/Received Date: 27.03.2024 Kabul Tarihi/Accepted Date: 31.08.2024 DOI: 10.54365/adyumbd.1459930

ÖZET

Yapılan çalışmada deney motoru, modifiye edilerek RCCI konseptine göre çalışır hale getirilmiş tek silindirli dizel motordur. Yüksek reaktiviteli yakıt (HRF) olarak dizel ve düşük reaktiviteli yakıt (LRF) olarak da izooktan (%15, %30, %45 ve %60 karışım oranlarında) kullanılmıştır. Deneyler üç farklı yükte (%20, %40 ve %60) ve 2400 (d/d) sabit motor devrinde gerçekleştirilmiştir. %20 yükte basınç pik değerinde LRF kullanımı ile önemli bir değişim olmamakla birlikte, motor yükü ve LRF karışım oranı arttıkça basınç ve HRR pik değeri artmış, bu değerlerin oluştuğu krank açısı ilerlemiştir. Motor performansı için önemli olan ortalama indike basınçta (OİB) LRF oranına bağlı olarak kısmi azalmalar görülmesine rağmen, %15 LRF oranı kullanımının tüm yüklerde OİB'nin dizel yakıtlı deneyde oluşan değerle hemen hemen aynı seviyede oluştuğu belirlenmiştir. LRF kullanımı ile düşük yükte NOx emisyonu, yüksek yükte CO emisyonu başarılı bir şekilde azaltılırken, HC emisyonu tüm deneylerde artış göstermiştir. Duman opaklığı tüm yük deneylerinde LRF ile azaltılırken, en büyük azalma %60 yükte yaklaşık olarak %97 oranında gerçekleşmiştir.

Anahtar Kelimeler: RCCI, İzooktan, Dizel motor, Emisyon, Yüksek oktanlı yakıt

AN EXPERIMENTAL STUDY ON ENGINE PERFORMANCE AND EMISSIONS OF A RCCI ENGINE FUELLED WITH DIFFERENT RATIOS OF ISOCTANE-DIESEL FUEL

ABSTRACT

In the conducted study, a single-cylinder diesel engine was modified to operate according to the RCCI concept. Diesel was used as HRF and iso-octane (in mixture ratios of 15%, 30%, 45%, and 60%) as LRF. Experiments were conducted at three different loads (20%, 40%, and 60%) and at a constant engine speed of 2400 rpm. While there was no significant change in the peak pressure value with the use of LRF at 20% load, as the engine load and LRF mixture ratio increased, both pressure and HRR peak value increased, and these values occurred at an advanced crank angle. Although partial decreases depending on the LRF ratio were observed in the IMEP, which is important for engine performance, it was determined that the use of 15% LRF ratio resulted in IMEP levels almost similar to those obtained in diesel-fueled experiments at all loads. With the use of LRF, NOx emissions were successfully reduced at low loads, and CO emissions were reduced at high loads, while HC emissions increased in all experiments. Smoke opacity was reduced with LRF at all load experiments, with the greatest reduction occurring at 60% load, approximately by 97%.

Keywords: RCCI, Iso-octane, Diesel engine, Emissions, High octane fuel

e-posta¹ : mujdatfirat@gmail.com ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-6978-9044>,

e-posta³ : yvarol@gmail.com ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-2989-7125>

* e-posta² : mutluokcu@gmail.com ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-8226-0994> (Sorumlu Yazar)

1. Giriş

Dizel motorlar yüksek verim ve düşük yakıt tüketimlerinden dolayı birbirinden farklı birçok çalışma alanında kullanılmaktadırlar [1,2]. Dizel motorların araştırıldığı birçok çalışmada, bu motorların genel olarak önemli avantajlara sahip olmasının vurgulanmasının yanında, özellikle zararlı emisyon üretim problemlerinin devam ettiğinden sıklıkla bahsedilmekte olduğu görülmüştür [3,4]. Emisyon üretim problemlerinin yanında, azalan fosil yakıt kaynakları da dizel motorların baş etmesi gereken başka bir problemdir. Son yıllarda literatürde dizel motor üzerine yapılan çalışmalarda, aynı anda hem emisyon problemlerinin çözümü hem de motor performansının iyileştirilmesini incelemek için enjeksiyon yöntemleri, egzoz sonrası sistemler ve alternatif yakıt kullanımı gibi parametrelerin incelendiği birçok çalışma görülmektedir [5–9]. Ayrıca, yapılan çalışmalarda araştırmacıların dizel motorlarda özellikle NO_x ve is emisyonlarının aynı anda azaltılabildiği ve motor performansında azalmaya sebep olmayan düşük sıcaklıklı yanma (LTC) konseptlerinin oldukça yaygın bir şekilde kullandığı tespit edilmiştir [10–12]. Bu konseptlerden biri olan reaktivite kontrollü sıkıştırma ateşleme (RCCI) modu, birçok araştırmacı tarafından dizel motorlarda yanmayı iyileştirmek ve emisyonların kontrol altında tutulmasını sağlamak için kullanılmaktadır. Bu çalışmalardan biri Poorghasemi ve arkadaşları tarafından yapılmıştır. Bu çalışmada, RCCI konseptine göre çalıştırılan hafif hizmet tip ve doğal gaz/dizel yakıtlı dizel bir motorda, dizel enjeksiyon strateji değişiminin RCCI yanma özelliklerine etkisini Converge CFD simülasyon programı kullanımı ile sayısal olarak incelemişlerdir. Karşımdaki doğalgaz oranının artmasının yanmayı kötüleştirdiği ve %95 oranında kullanılan doğal gazın, tutuşma gecikmesini oldukça uzattığı ve sonucunda yanmanın gerçekleşmediği bildirilmiştir. Yanma reaksiyonunda meydana gelen bu değişimde doğal gazın tutuşma gecikmesi üzerindeki etkisinin (oktan sayısı, setan sayısı gibi özelliklerden dolayı) önemli olduğu görülmüştür. Tüm bu değişimlerin NO_x emisyonunu azaltmasına rağmen, HC ve CO emisyonunda artışa sebep olduğu vurgulanmıştır [6]. Deb ve arkadaşları, dizel bir motorda LRF olarak asetilenin kullanıldığı bir çalışma yapmışlardır. Yapılan çalışmada asetilen ön karışım oranları ve gelişmiş dizel enjeksiyon zamanlamasının RCCI motor performansının etkisinin incelenmesi analiz edilmiştir. Çalışmada sunulan bulgulara göre, aynı deney koşullarında, RCCI konsepti kullanımı ile geleneksel dizel yanmaya göre NO_x emisyonlarının yaklaşık olarak %280, HC emisyonlarının %65 arttığı belirlenmiştir. Ayrıca, CO emisyonlarının yaklaşık olarak %42 azaldığı ve duman opaklığının da %79,6'dan %35,1 seviyesine düştüğü vurgulanmıştır. Yapılan bu çalışmada yanma reaksiyonlarının kullanılan asetilen karışım oranına göre üst ölü noktaya (ÜÖN) yakınlığının hem emisyon hem de motor performansı üzerindeki etkisinin önemli olduğu sonucuna varılmıştır [13]. Elbanna ve arkadaşları RCCI modunda çalışan bir motorda, etanol-dizel yakıtlarının kullanıldığı bir çalışma yapmışlardır. Yapılan bu çalışmada, kullanılan yakıtın üç farklı oranda oktan sağlayacak şekilde oranları belirlenmiş ve deneylerde kullanılarak bunların motor performansına etkisi analiz edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, kullanılan yakıtların oktan sayısının motor performansı ve emisyonları üzerinde olumlu etkileri olduğu vurgulanmıştır [14]. Zou ve arkadaşları, RCCI konseptli bir dizel motorda metanol, etanol, n-bütanol ve dizel yakıtlarının kullanımı ile motor performansı üzerindeki etkilerini inceledikleri sayısal bir çalışma yapmışlardır. Sayısal çalışma KIVA-3vr2 CFD kodu ile yürütülmüştür. Metanol-dizel (MD) ve etanol-dizel (ED) yakıtlarının kullanımı ile is ve NO_x emisyonlarının benzin-dizel (GD) ve n-bütanol-dizel (nBD) kullanımlarına kıyasla daha yüksek olduğu belirtilmiştir. Bu durumun düşük ısı değerinden dolayı MD ve ED yakıtlarının kullanımında daha fazla yakıt kullanımına bağlı olduğu vurgulanmıştır. Daha fazla kullanılan yakıtın, yanma başlamadan önce yanma odasında daha fazla zengin karışım bölgeleri oluşturduğu ve dolayısıyla daha yüksek NO_x ve is oluştuğu ifade edilmiştir. Ayrıca yakıtların tutuşma gecikmesinin de motor performansı ve emisyonu üzerindeki etkisinin önemli olduğu gözlenmiştir [15].

Yapılan incelemelerde RCCI konseptinin dizel motorlarda kullanımı ile motor performans ve emisyonların kullanılan yakıtların türü ve oranına bağlı olarak kontrol altında tutulabileceği görülmüştür. Ayrıca, literatürde yapılan araştırmalarda, yakıtların oktan sayısının, alt ısı değerinin ve viskozitesi başta olmak üzere, yakıt termofiziksel özelliklerinin motor performansının ve emisyonlarının üzerine etkisinin oldukça önemli olduğu belirlenmiştir. Son olarak, yapılan bir çalışmada, motorlarda

kullanılan yakıtların oktan sayısının, silindi içi dolguların alev hızının artmasına katkıda bulunduğu vurgulanmaktadır [16]. Bu bağlamda, RCCI motorlarda LRF olarak kullanılan yakıtların alt ısı değer ve oktan sayısının arzu edilen emisyon kontrolü ve motor performansı değerlerinin elde edilmesinde önemli bir rol oynadığı kanısına varılmıştır ve yapılan çalışmada, hem alt ısı değeri hem de oktan sayısı bakımından avantajları olduğu değerlendirilen izooktan yakıtı LRF olarak kullanılmıştır. Yapılan çalışmada temel amaç, LRF olarak kullanılan izooktan ile RCCI konseptli dizel bir motorda motor performansında her hangi bir azalma olmadan (yüksek ısı değerinden dolayı) motor emisyonlarının kontrolünü sağlamaktır. Literatürde dizel motorlarda izooktanın yakıt olarak kullanımı mevcuttur. Ancak, yapılan çalışmada izooktanın dört farklı oranda (%15, %30, %45 ve %60) ve üç farklı motor yükünde kullanımı ile RCCI konseptli motorlarda izooktanın kullanımının motor performans ve emisyonlarına etkisinin geniş bir çerçevede ele alınması sağlanmış ve bu açıdan literatüre katkı vermesi hedeflenmiştir. Son olarak, LRF olarak izooktan kullanımının bir diğer sebebi de izooktanın 100 oktan sayısına sahip olması ve bu anlamda RCCI konseptli motorlarda referans bir yakıt olarak önemli katkılar vereceği beklentisidir.

2. Materyal ve Metot

Bu çalışmada RCCI konseptine göre çalışmaya uygun hale getirilen tek silindirli dizel bir motorda LRF olarak izooktan ve HRF olarak dizel kullanımının motor performansı ve emisyonları üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Kullanılan dizel yakıtı EN590 standartlarına uygun ve hali hazırda kullanımı olan dizel yakıtıdır. Çalışmada kullanılan izooktan (%99.5 saflıkta) ise Isolab firmasından temin edilmiştir. Bu çalışma için kullanılan yakıtların özellikleri Çizelge 1’de verilmiştir [17].

Çizelge 1. Deneyleerde kullanılan yakıtların özellikleri

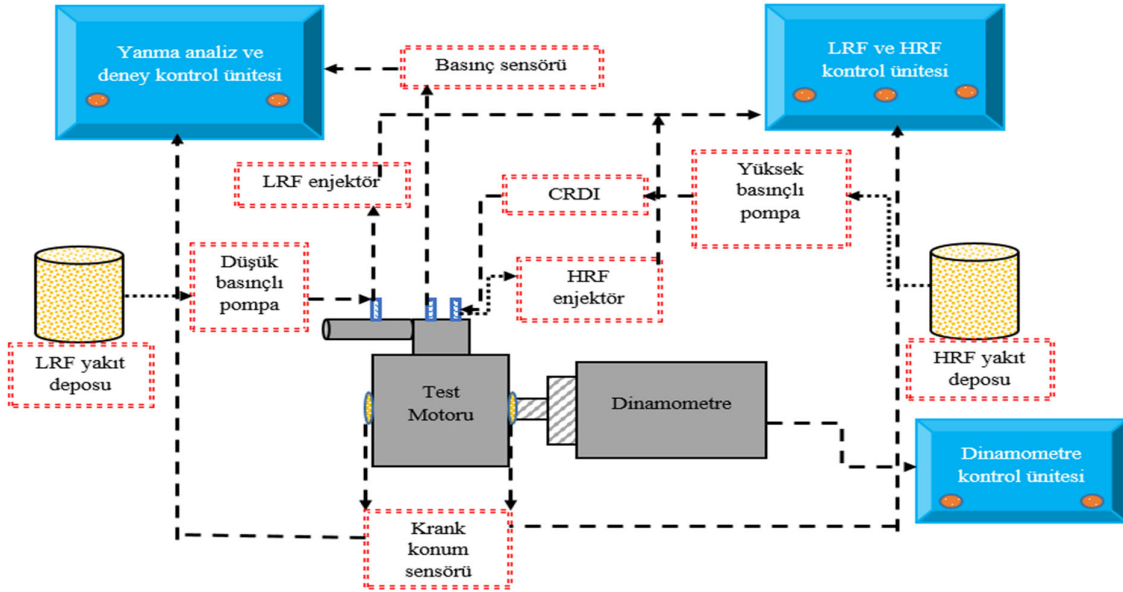
Özellikler	Dizel	İzooktan
Moleküler Formül	--	C8H18
Saflık	--	≥ 99.5 %
Moleküler Ağırlık(g/mol)	--	114.23
Yoğunluk (kg/m ³)	829.4	690
Kaynama Noktası (°C)	180-350	99
Parlama noktası (°C)	67	-12
Viskozite mm ² /s	2.889	0.72
Alt Isıl Değer (MJ/kg)	43.14	44.31[18]-44.8[19]
Buharlaşma Gizli Isısı (kJ/kg)	358	283
Kendiliğinden tutuşma sıcaklığı (°C)	210-250	415
Karbon İçeriği (%)	80.13	-
Hidrojen İçeriği (%)	12.86	-
Oksijen İçeriği (%)	6.35	-
Oktan Sayısı	-	100[18]
Setan Sayısı	56	11-17

Deneyleer maksimum tork devri olan 2400 d/d motor devrinde ve %20, %40 ve %60 sabit motor yükleri aralığında yürütülmüştür. Her deney şartında geleneksel dizel yanmasında motora verilen yakıtın çevrim başına toplam enerjisi sabit tutulmak üzere RCCI modunda kullanılacak LRF oranı bu enerji

miktarı üzerinden %15,%30,%45 ve %60 olarak tüm deneylerde uygulanmıştır. Örneğin, %20 yükte dizel deneyinde motora 310 J/çevrim enerji verildiği tespit edilmiştir. RCCI deneyinde, %20 yükte dizelin sağladığı enerji olan 310 J/çevrimin değerine göre izooktan oranı belirlenmiştir. Yani %20 yükte RCCI deneyi için 310 J/çevrim enerji içeriğinin sırasıyla %15, %30, %45 ve %60'ı izooktan ile verilirken, %85, %70, %55 ve %40'ı da dizel yakıtı ile verilmiştir. Bu değer %40 yük için 440 J/çevrim ve %60 yük için 590 J/çevrim olarak ölçülmüş ve RCCI deneylerinde de yukarıda bahsedilen yöntemle göre LRF ve HRF oranları için yakıt miktarı belirlenmiştir. İzooktan referans alınarak isimlendirilen yakıt oranları için kısaca ön karışım oranı (KO) ifadesi tüm çalışmada kullanılmıştır. KO Aşağıdaki denkleme göre KO belirlenmiştir.

$$KO = \frac{m_{izooktan} * LHV_{izooktan}}{m_{dizel} * LHV_{dizel} + m_{izooktan} * LHV_{izooktan}} \quad (1)$$

Burada, $m_{izooktan}$ ve m_{dizel} izooktan ve dizelin yakıt kütesidir. $LHV_{izooktan}$ ve LHV_{dizel} ise izooktan ve dizelin alt ısı değerini temsil etmektedir. Çalışmada tek silindirli dizel bir motor kullanılmıştır. Motora ait özellikler Çizelge 2'de, deney şeması ise Şekil 1'de verilmiştir.



Şekil 1. Deney seti şeması

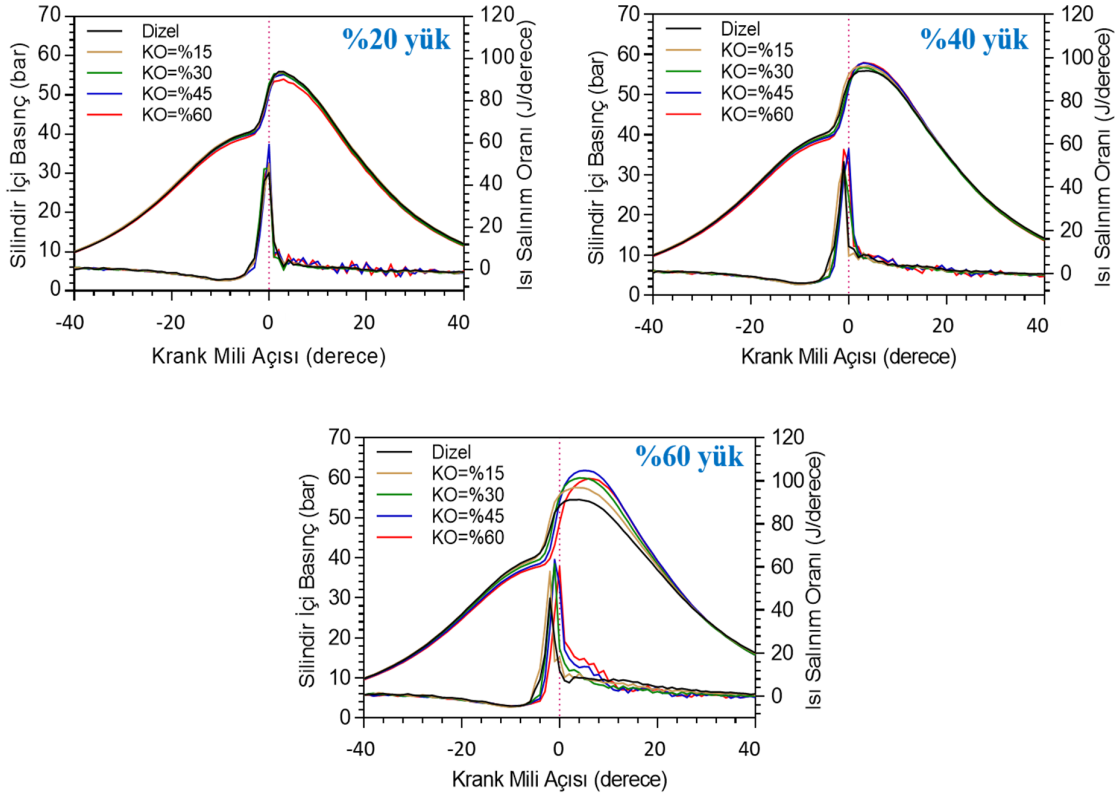
Çizelge 2. Deney motorunun özellikleri.

Motor enjeksiyon tipi	Common rail direkt enjeksiyon (CRDI) hava soğutmalı
Silindir sayısı	1
Sıkıştırma oranı	18.1:1
Silindir çap*strok	86 x 70 (mm)
Silindir hacmi	0,406 (L)
Çıkış gücü (3000 d/d)	7.4 kW
Maksimum tork (2400 d/d)	25.7 Nm

Deneylerde dizel 300 bar basınçla silindir kapağına yerleştirilen bir enjektör vasıtasıyla doğrudan yanma odasına sıkıştırma zamanı sonunda 21° krank mili açısında (sÜÖN) enjekte edilmektedir. LRF olarak kullanılan izooktan ise, emme zamanı başlangıcında 15° krank mili açısında (sÜÖN) 5 bar basınçla port tipi enjektör (PFI) yardımıyla emme portuna enjekte edilmektedir. Yapılan çalışmada duman opaklığı ve egzoz emisyonu değerlerini belirlemek için Bosch RT430 ve BEA 350 cihazları kullanılarak ölçümler yapılmıştır. Şekil 1'de deney setine ait genel görünüm gösterilmiştir. Sonuçlar anlık olarak bilgisayara aktararak kaydedilmiş ve analizlerin yapılacağı bulgular oluşturulmuştur. Motor performansını analiz etmek için silindir gaz basıncı bir basınç transdüseri (Optrand D33288-GPA) tarafından 1° krank mili açısında (KMA) aralıklarla ve ortalama 200 ardışık döngü ile kayıt altına alınmıştır. Ayrıca, krank mili açısının konumu, 360 sinyal frekansına sahip bir Kübler kodlayıcı tarafından tespit edilerek silindir basıncı verileriyle birlikte veri toplama sistemi kullanılarak kaydedilmiştir. Tüm bu veriler bir şarj amplifikatörü aracılığıyla NEL presto'nun Febris Yazılımı tarafından işlenerek anlamlı grafiklerle haline getirilmiştir. Bu bilgiler daha sonra grafiklere aktararak analiz edilmiş ve çalışmada sunulmuştur.

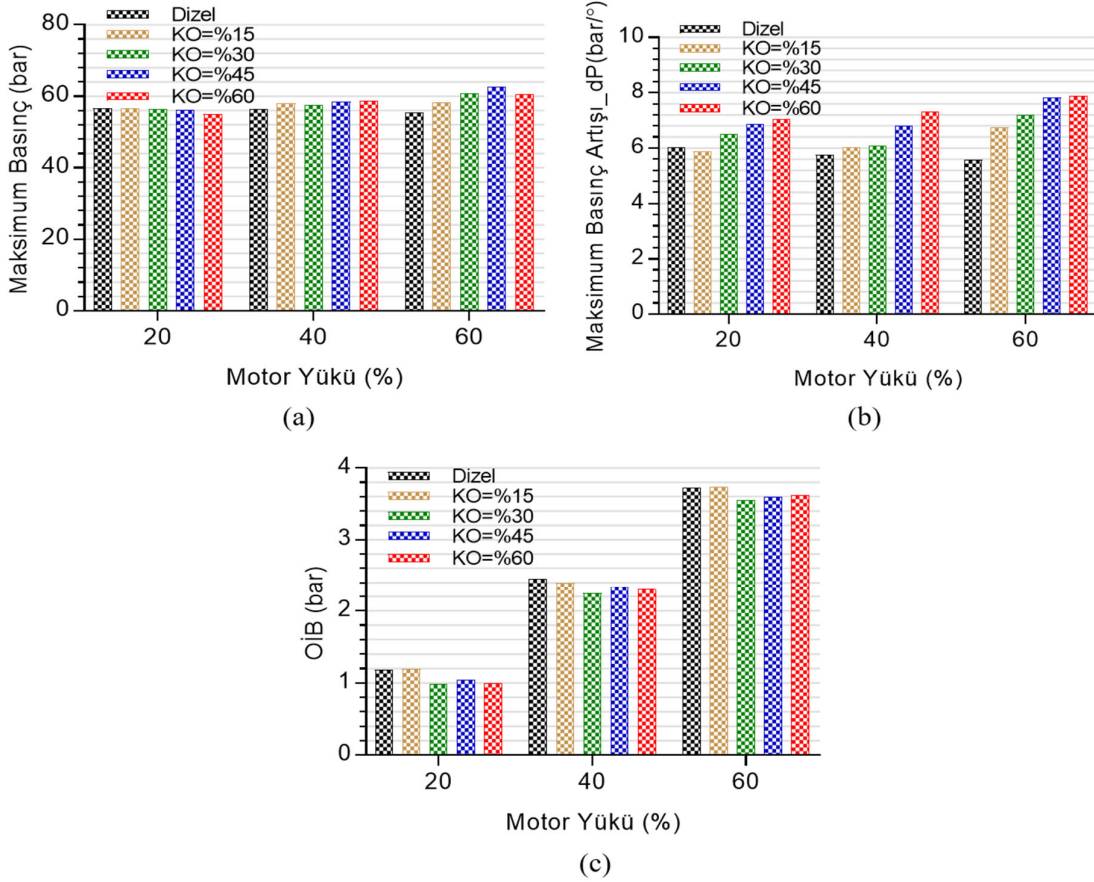
3. Sonuçlar ve Tartışma

Deneyler iki aşamadan oluşmuştur. İlk aşamada deney motorunda dizel yakıtı %100 oranda ve %20, 40 ve 60 olmak üzere üç farklı yükte 2400 d/d sabit devirde kullanılmıştır. Ardından izooktan %15, %30, %45 ve %60 oranında aynı deney şartları altında LRF olarak kullanarak RCCI deneyleri yapılmıştır. Deneylerde sadece dizelin yakıt olarak kullanıldığı deneylere geleneksel dizel deneyleri ifadesi kullanılırken, izooktanlı yani LRF'nin kullanıldığı deneyler için ise RCCI modu deneyleri ifadesi kullanılmıştır. Elde edilen veriler motor performans (silindir içi basınç, HRR, OİB, maksimum basınç, maksimum basınç artışı ve toplam ısı salınımı) ve emisyonları (CO, CO₂, HC, NO_x ve duman opaklığı) olmak üzere iki bölümde sunulmuştur. İlk olarak motor performansına ait veriler aşağıda sunulmuştur.



Şekil 2. Silindir içi basınç ve ısı salınım oranının (HRR) karışım oranı ve motor yüküne bağlı değişimi

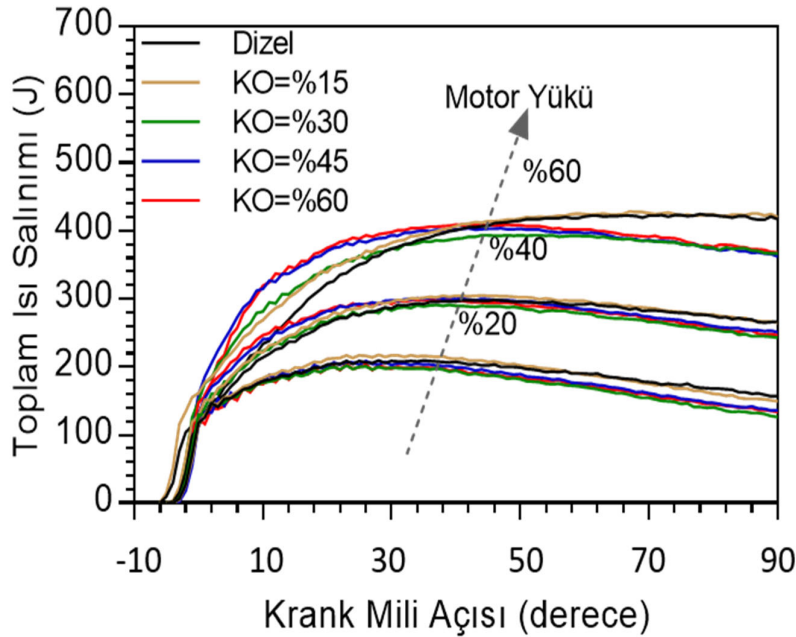
Şekil 2'deki grafikler, izooktanın çeşitli karışım oranlarının ve motor yükünün silindir içi basınç ve ısı yayılımına etkisini göstermektedir. Bulgulara göre, %20 motor yükünde LRF kullanımıyla silindir içi basınçta dikkate değer bir değişiklik gözlenmemektedir. Ancak, motor yükü %40 ve %60'a yükseldiğinde, LRF'nin tesiri artmakta ve buna paralel olarak silindir basıncı yükselmektedir. Özellikle %60 motor yükü deneylerinde, LRF'nin basınç ve ısı yayılımını önemli ölçüde artırdığı gözlenmektedir. %20 yükte azalan dizel oranı dolgunun alt ısıl değerinde bir azalmaya sebep olmasına rağmen, RCCI konsepti etkisinin daha homojen bir dolgu oluşturması ve sonucunda basınçta azalma meydana gelmediği değerlendirilmiştir. Ayrıca, %20 motor yükünde LRF oranına bağlı olarak değişen tutuşma gecikmesinin silindirdeki yerel zengin karışım bölgelerinin azalmasına ve sonuç olarak basınç değişiminin kısmen kontrol altında olmasına neden olduğu düşünülmektedir. Bu şekilde, yanma tepkimelerinin daha kontrollü bir şekilde gerçekleştiği düşünülmektedir. Düşük yükte, özellikle %60 motor yükünde LRF bileşim oranının artmasının silindir içi basınç değerini aniden yükselttiği gözlemlenmiştir. Yüksek yükte, LRF bileşim oranının artmasıyla birlikte, silindir içinde zengin karışım bölgelerinin oluştuğu, tutuşma gecikmesinin uzadığı ve yanma tepkimelerinin hızlandığı düşünülmektedir. Sonuç olarak, geleneksel dizel motora göre RCCI konsepti uygulamasıyla %60 motor yükünde basınç pik değerinin HRF'ye göre yaklaşık olarak %11 oranında arttığı ve bu yükteki basınç ve ısı yayılımı üzerindeki etkisinin %20 ve %40 motor yüklerinden daha fazla olduğu belirlenmiştir.



Şekil 3. Maksimum basınç (a), maksimum basınç artışı (b) ve OİB'nin (a) karışım oranı ve motor yüküne bağlı değişimi

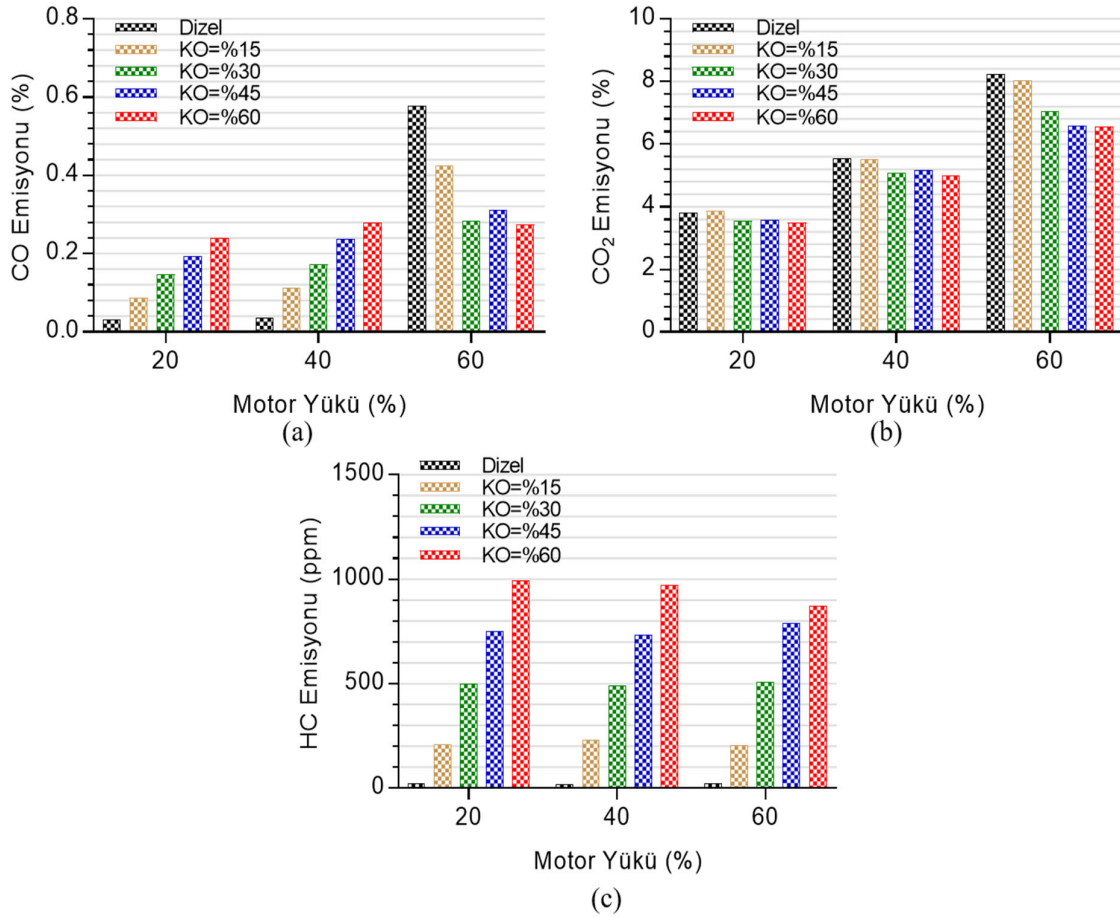
Şekil 3, RCCI konseptli bir dizel motorda çeşitli motor yükü koşullarında LRF karışım oranının değişiminin OİB, maksimum basınç ve maksimum basınç artışı üzerindeki etkisini grafiksel olarak göstermektedir. Bu grafiklerin detaylı analizi yapıldığında, motor yükü ile birlikte içeri alınan dolgunun artışının, OİB değerini artırdığı görülmektedir. Ancak, LRF karışım oranındaki artışın OİB üzerindeki

etkisi, %15 KO kullanımı dışında diğer oranlarda belirgin bir azalmaya neden olmuştur. %15 KO kullanımında ise OİB değerinde hemen hemen bir değişiklik olmamış ve dizel ile benzer seviyede bir OİB değeri elde edilmiştir. Bu bulgular, OİB değerinin artması veya azalmasında en önemli belirleyicilerin maksimum basınç değeri ve bu basıncın olduğu krank açısı olduğunu ortaya koymaktadır. Bu durum, pozitif işin artışının aynı zamanda OİB değerini artırdığını göstermektedir. Tüm deneylerde, %15 karışım oranı dışında diğer LRF karışım oranlarının OİB'yi azaltıcı bir etki yarattığı belirlenmiştir. LRF karışım oranındaki artışın özellikle %40 ve %60 motor yüklerinde silindir içindeki basınç değerini artırdığı belirlenmiştir. Ancak, bu artışa rağmen, LRF oranındaki artışın OİB'yi azaltıcı bir etkide bulunduğu görülmüştür. Bu durumun, basınç pik değerinin olduğu krank açısının silindirde oluşan negatif işi artırıcı etkide bulunmasıyla ilişkili olduğu düşünülmektedir. Bu durum, maksimum basınç ve maksimum basınç artışı grafiklerinde de açıkça görülmektedir. Bu sonuçlar, LRF'nin artan oranlarda kullanılmasının genel olarak OİB'yi azaltıcı bir etkiye sahip olduğunu, ancak %15 KO kullanımında elde edilen değerlerin dizel ile benzer olduğunu ortaya koymaktadır.



Şekil 4. Toplam ısı salınımının karışım oranı ve motor yüküne bağlı değişimi

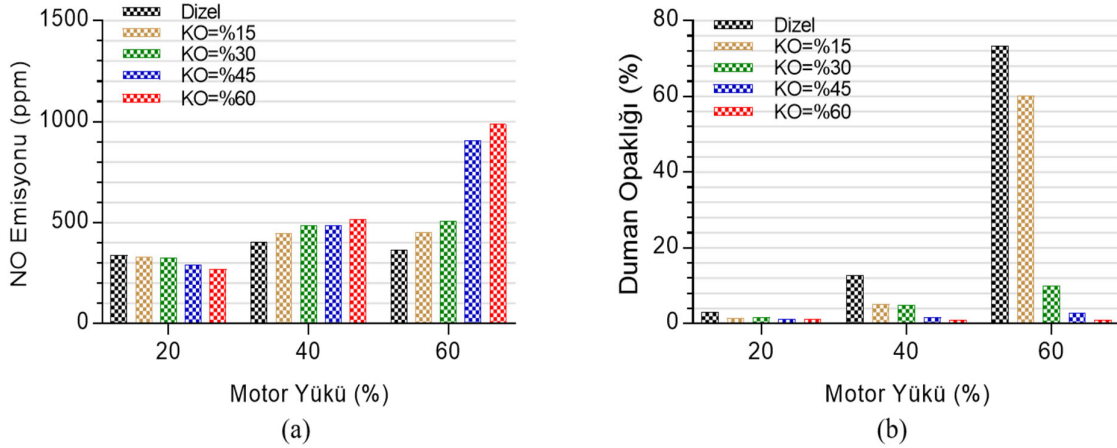
Şekil 4, motor yükünün %20'den %60'a değiştiği deneylerde, LRF karışım oranındaki değişimin toplam ısı salınımı verilerine olan etkilerini grafiksel olarak göstermektedir. Motor yükünün artmasıyla birlikte yakıt miktarında artış görülmekte ve bu da toplam ısı salınımının artmasına neden olmaktadır. Genel olarak, farklı motor yükü durumlarında kullanılan LRF'lerin toplam ısı salınım oranında farklı etkiler oluşturduğu gözlenmiştir. %20 yükte, LRF kullanımının yanma reaksiyonlarını daha kontrollü bir şekilde yönettiği ve ısı salınımının yanma süreci boyunca daha geniş krank açıları meydana geldiği ve ani yükselmeler olmadığı belirlenmiştir. %40 ve %60 yük durumlarında ise tutuşma gecikmesinin uzamasıyla birlikte dolgu enerjisinin arttığı ve yanma reaksiyonlarının aniden başlayarak %20 yüke kıyasla daha erken krank açıları daha büyük bir kısmını oluşturduğu görülmüştür. Ayrıca, tüm deneylerde, dizel ve %15 oranında izooktan kullanımında oluşan toplam ısı salınımının diğer karışım oranlarına göre daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Bu durum, silindir içinde homojen dolgunun daha iyi yanmasından kaynaklanmakta olup, neredeyse tamamının yanarak enerjisini açığa çıkarmasından kaynaklanmaktadır. Özetle, motor yükü ve LRF karışım oranındaki artışlarla birlikte dolgu enerjisinin daha hızlı ortaya çıktığı ve toplam ısı salınımının daha erken krank açıları olduğu gözlenirken, %15 oranında kullanılan izooktanın ısı salınımının dizel benzeri bir gelişim gösterdiği belirlenmiştir.



Şekil 5. CO (a), CO₂ (b) ve HC (c) emisyonlarının karışım oranı ve motor yüküne bağlı değişimi

Şekil 5, farklı yük seviyelerinde LRF karışım oranının CO, CO₂ ve HC emisyonları üzerindeki etkisini gösteren grafikleri içermektedir. CO verileri, %20 ve %40 yüklerde LRF karışım oranının artmasıyla CO emisyonunun yükseldiğini, ancak %60 yükte ise azaldığını göstermektedir. Genel olarak, CO emisyonunun eksik yanma ürünü olduğu bilinse de, %20 ve %40 yüklerde daha verimli bir yanma süreci gözlemlenmiştir. Bu durum, CO emisyonunun düşük ve orta yüklerde azalması ancak yüksek yükte artmasıyla çelişmektedir, bu da CO emisyonunun sadece verimli yanma sürecine bağlı olmadığını göstermektedir. Düşük ve orta yüklerdeki CO emisyonunun artışı, yanma reaksiyon sıcaklığının LRF kullanımıyla azalmasından kaynaklanmaktadır. %60 yükteki azalmanın sebebi ise artan reaksiyon sıcaklığıdır. Bu durum, CO₂ emisyonundaki değişimle de uyumlu bir şekilde gözlenmektedir. CO₂ emisyonu, LRF kullanımıyla tüm yüklerde azalmıştır, özellikle %60 yükte belirgin bir azalma görülmüştür. HC emisyonları ise artan LRF miktarıyla tüm yük seviyelerinde artmıştır, özellikle %20 ve %40 yüklerinde daha yüksek emisyonlar gözlemlenmiştir. HC oluşumunu etkileyen faktörler arasında yanma sürecindeki sıcaklık değişimi ve LRF'nin emme zamanında emme portuna enjekte edilmesi yer almaktadır. Düşük ve orta yüklerdeki düşük yanma sıcaklığı nedeniyle daha fazla HC emisyonu oluşurken, %60 yükte artan sıcaklıkla HC emisyon seviyesinin azaldığı gözlemlenmiştir. Tüm veriler incelendiğinde, emme zamanında porta düşük basınçla enjekte edilen izooktanın, sıkıştırma zamanı sonuna kadar cidarlarda birikmesi ve bu bölgelerde sıcaklığın azalmasından dolayı tüm yüklerde HC ve CO emisyonlarını artırdığı saptanmıştır. Ayrıca, bu durum özellikle %20 yükte silindir sıcaklığını önemli oranda azaltmış ve NO_x emisyonunda azalmaya sebep olmuştur (Şekil 6). CO₂ emisyonunun %20 ve %40 yüklerde azalmasının, azalan silindir sıcaklığı ve artan CO emisyonuna bağlı olmasına karşın, %60 yükte, özellikle NO_x emisyonunda meydana gelen ani artışlardan dolayı azaldığı

değerlendirilmiştir. Sonuç olarak, benzer sebeplerden dolayı tüm yüklerde LRF karışım oranının yanma reaksiyon sıcaklığını önemli ölçüde etkilediği ve bu durumun CO, CO₂ ve HC emisyonları üzerinde etkili olduğu görülmüştür. Özellikle %60 yükte CO emisyonundaki azalış ve tüm yüklerde CO₂ emisyonundaki azalış, LRF olarak izooktan kullanımı açısından önemlidir.



Şekil 6. NO emisyonu (a) ve duman opaklığının (b) karışım oranı ve motor yüküne bağlı değişimi

Şekil 6'da, LRF kullanımının değişen motor yükü koşullarında NO emisyonu ve duman opaklığı üzerindeki etkileriyle ilgili veriler sunulmaktadır. NO emisyonu verilerine göre, %20 yükte LRF kullanımının azaltıcı etkisi olduğu, ancak %40 ve %60 yüklerde LRF kullanımının artırıcı etkisi olduğu gözlenmiştir. NO emisyonu genellikle çeşitli faktörlere bağlı olarak oluşur, bunlar arasında silindir içi sıcaklık, oksijen yoğunluğu, ısı salınım hızı ve karışım zenginliği yer alır. %20 yük deneylerinde LRF'nin kullanımı, silindir içi sıcaklığın düşmesine ve daha homojen bir dolgunun oluşmasına neden olmuştur, bu da NO emisyonunda azalmaya yol açmıştır. Orta ve yüksek yüklerde ise, yanma reaksiyonlarının daha yüksek sıcaklıklarda gerçekleştiği ve bunun da NO emisyonunda artışa neden olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, bu yüklerde LRF ile birlikte basınç artışının ısı salınım hızını artırdığı ve bu durumun NO emisyonunu artırdığı düşünülmektedir. Duman opaklığına gelince, tüm yük deneylerinde LRF kullanımının duman opaklığını azalttığı görülmüştür. Özellikle %60 motor yükünde dahi, LRF kullanımının ve karışım oranı artışının duman opaklığını önemli ölçüde azalttığı gözlenmiştir. Duman opaklığının büyük bir kısmı yanmamış karbon atomlarından kaynaklanır. LRF kullanımıyla, yanma sürecindeki karbon atomlarının farklı reaksiyonlarla dönüştürüldüğü ve bu nedenle duman opaklığında belirgin bir azalma olduğu gözlemlenmiştir. Sonuç olarak, özellikle %60 yükte LRF kullanımının NO emisyonu ve duman opaklığı üzerinde etkili olduğu ve artan LRF karışım oranıyla bu etkinin arttığı belirlenmiştir. RCCI konsepti kullanılarak %20 yükte NO emisyonunun kontrol altında tutulduğu ve duman opaklığının tüm yüklerde azaldığı, özellikle %60 yükte yaklaşık olarak %97 oranında bir azalma olduğu gözlemlenmiştir.

4. Sonuçlar

Yapılan çalışmada, modifiye edilmiş tek silindirli, dört zamanlı, direkt enjeksiyonlu RCCI konseptli dizel bir motorda deneyler yapılmıştır. Deneylerde, LRF ve HRF'nin farklı oranlarda kullanımının motor yanma, performans ve egzoz emisyonları üzerindeki etkilerinin belirlenmesi %20, %40 ve %60 yükte ve 2400 d/d'de şartları altında gerçekleştirilmiştir. Aşağıda deneylerde öne çıkan bazı önemli sonuçlar şöyledir:

- Motor yükü arttıkça LRF kullanımının hem basınç hem de HRR üzerindeki etkisi daha belirgin bir hal almıştır. Tüm deneyler arasında basınç ve HRR de en büyük artış %60 yükte %45 LRF kullanımında meydana gelmiştir.

- LRF kullanımı ile OİB genelde azalma eğilimi göstermiştir. Ancak tüm yüklerde %15 LRF KO kullanımı ile dizele en yakın OİB değerleri elde edilmiştir. Benzer durum toplam ısı salınımı verilerinde gerçekleşmiştir. %15 LRF KO kullanımı ile dolgunun enerjisinin daha fazla ortaya çıktığı tespit edilmiştir.

- CO emisyonu düşük ve orta yükte LRF kullanımı ile artarken %60 yükte önemli derecede azalmıştır. Buna karşın tüm deneylerde LRF kullanımı CO2 emisyonunu azaltmıştır. HC emisyonu ise tüm yüklerde RCCI konsepti uygulanması ile artış göstermiştir. %20 yükte NOx emisyonu önemli orada RCCI konsepti ile azaltılmıştır. Ancak orta ve yüksek yükte LRF kullanımı NOx emisyonunu artırmıştır. Tüm deneylerde LRF'nin en etkili olduğu sonuç duman opaklığı olmuştur. Tüm yüklerde LRF kullanımında duman opaklığının azaldığı görülmüştür. Özellikle %60 yükte %97 ye varan oranlarda azalmalar meydana gelmiştir.

Tüm veriler incelendiğinde, dizel motora RCCI konsepti ile uygulanan izooktanın duman opaklığını azalmada oldukça etkin olmakla birlikte, %15 LRF KO kullanımının motor performans, yanma ve emisyonları üzerindeki etkisinin optimum seviyede önemli kazanımları olduğu tespit edilmiştir.

Teşekkür

Bu çalışma Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) (proje no.118M650) tarafından desteklenmiştir.

Çıkar Çatışması Beyanı

Makale yazarları herhangi bir kurum, kuruluş, kişi ile kişisel ve finansal çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedirler.

Kaynaklar

- [1] Feng H, Chen X, Sun L, Ma R, Zhang X, Zhu L, et al. The effect of methanol/diesel fuel blends with co-solvent on diesel engine combustion based on experiment and exergy analysis. *Energy* 2023;282:128792. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.128792>.
- [2] Fırat M, Altun Ş, Okcu M, Varol Y. Experimental investigation on combustion and emission characteristics of reactivity controlled compression ignition engine powered with iso-propanol/biodiesel blends. *Propuls Power Res* 2022;11:224–39.
- [3] Yin X, Li W, Duan H, Duan Q, Kou H, Wang Y, et al. A comparative study on operating range and combustion characteristics of methanol/diesel dual direct injection engine with different methanol injection timings. *Fuel* 2023;334:126646. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.126646>.
- [4] Fırat M, Altun Ş, Okcu M, Varol Y. Comparison of ethanol/diesel fuel dual direct injection (DI2) strategy with reactivity controlled compression ignition (RCCI) in a diesel research engine. *Energy* 2022;255:124556.
- [5] Öztürk G, Tanyeri B, Öner C. Investigation of effects on fuel consumption and exhaust emissions by using bioethanol gasoline mixture in an engine with ultrasonic fuel system. *Therm Sci* 2023:163–163.
- [6] Poorghasemi K, Saray RK, Ansari E, Irdmoussa BK, Shahbakhti M, Naber JD. Effect of diesel injection strategies on natural gas/diesel RCCI combustion characteristics in a light duty diesel engine. *Appl Energy* 2017;199:430–46. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.05.011>.

- [7] Ouchikh S, Lounici MS, Loubar K, Tarabet L, Tazerout M. Effect of diesel injection strategy on performance and emissions of CH₄/diesel dual-fuel engine. *Fuel* 2022;308:121911.
- [8] Firat M, Coşkun N, Okcu M, Varol Y. Numerical investigation of regeneration process of diesel particulate filter (DPF) made of different constitutive materials. *J Fac Eng Archit Gazi Univ* 2019;34.
- [9] Xu L, Xu S, Bai X-S, Repo JA, Hautala S, Hyvönen J. Performance and emission characteristics of an ammonia/diesel dual-fuel marine engine. *Renew Sustain Energy Rev* 2023;185:113631. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113631>.
- [10] Duan H, Jia M, Chang Y, Liu H. Experimental study on the influence of low-temperature combustion (LTC) mode and fuel properties on cyclic variations in a compression-ignition engine. *Fuel* 2019;256:115907.
- [11] Chaudhari VD, Deshmukh D. Diesel and diesel-gasoline fuelled premixed low temperature combustion (LTC) engine mode for clean combustion. *Fuel* 2020;266:116982.
- [12] Okcu M, Varol Y, Altun Ş, Firat M. Effects of isopropanol-butanol-ethanol (IBE) on combustion characteristics of a RCCI engine fueled by biodiesel fuel. *Sustain Energy Technol Assess* 2021;47:101443. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101443>.
- [13] Deb P, Paul A. Advancing RCCI engine performance via optimal acetylene premix ratios and advanced diesel injection timing: An experimental investigation. *Environ Prog Sustain Energy n.d.;n/a:e14375*. <https://doi.org/10.1002/ep.14375>.
- [14] Elbanna AM, Cheng X, Yang C, Elkelay M, Bastawissi HA-E, Xu H. Statistical analysis of ethanol/diesel dual-fuel combustion of compression ignition engines in RCCI mode using multi-injection strategies. *Sustain Energy Fuels* 2023;7:2749–63. <https://doi.org/10.1039/D3SE00299C>.
- [15] Zou X, Wang H, Zheng Z, Reitz R, Yao M. Numerical Study of the RCCI Combustion Processes Fuelled with Methanol, Ethanol, n-Butanol and Diesel. Warrendale, PA: SAE International; 2016. <https://doi.org/10.4271/2016-01-0777>.
- [16] Pan S, Li X, Han W, Huang Y. An experimental investigation on multi-cylinder RCCI engine fueled with 2-butanol/diesel. *Energy Convers Manag* 2017;154:92–101. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.10.047>.
- [17] Mutlu Okcu. Experimentally and Numerically Investigation of Combustion Characteristics and Pollutant Emissions at Low Temperature Combustion in RCCI Engine. PhD. Firat University, 2021.
- [18] Tang Q, Liu H, Ran X, Li M, Yao M. Effects of direct-injection fuel types and proportion on late-injection reactivity controlled compression ignition. *Combust Flame* 2020;211:445–55. <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2019.10.018>.
- [19] Cinar C, Uyumaz A, Solmaz H, Sahin F, Polat S, Yilmaz E. Effects of intake air temperature on combustion, performance and emission characteristics of a HCCI engine fueled with the blends of 20% n-heptane and 80% isooctane fuels. *Fuel Process Technol* 2015;130:275–81. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2014.10.026>.