

## Reaktif Kontrollü Sıkıştırma İle Ateşlemeli (RCCI) Bir Motorda Lamdanın Yanma Karakteristiklerine Etkileri

Ahmet UYUMAZ<sup>1</sup>, Hamit SOLMAZ<sup>2</sup>, Fahrettin BOZ<sup>1</sup>, Emre YILMAZ<sup>2</sup>, Seyfi POLAT<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Otomotiv Teknolojisi Programı, Burdur

<sup>2</sup>Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Otomotiv Mühendisliği Bölümü, Ankara

<sup>3</sup>Hitit Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Mekatronik Mühendisliği Bölümü, Çorum

e-posta: [auyumaz@mehmetakif.edu.tr](mailto:auyumaz@mehmetakif.edu.tr)

Geliş Tarihi: 18.02.2017 ; Kabul Tarihi: 23.11.2017

### Özet

Bu çalışmada reaktif kontrollü sıkıştırma ile ateşlemeli (RCCI) bir motorda lamdanın ( $\lambda$ ) yanma karakteristikleri üzerindeki etkileri deneysel olarak incelenmiştir. Dört zamanlı, dört silindirli benzinli bir motor tam yük şartlarında referans yakıt PRF40 (Primary reference fuel, %40 porttan izooktan, %60 direkt n-heptan) kullanılarak  $\lambda=0.83$ ,  $\lambda=0.88$ ,  $\lambda=1$ ,  $\lambda=1.24$ ,  $\lambda=1.61$  ve  $\lambda=2.65$  lamda değerlerinde sabit 40°C emme giriş sıcaklığı ve 1000 d/d motor devrinde çalıştırılmıştır. RCCI yanma modunda yanma karakteristikleri, indike termik verim, net iş, kümülatif ısı yayılımı ve özgül yakıt tüketiminin değişimleri incelenmiştir. Deneysel çalışmalar sonucunda karışımın zenginleşmesi ile yanmanın rötara alındığı görülmüştür. Maksimum silindir içi basınç  $\lambda=0.83$  ile elde edilmiştir. Lamda arttıkça indike termik verimin arttığı, özgül yakıt tüketiminin azaldığı görülmüştür. Maksimum indike termik verim  $\lambda=1.61$ 'da %38.36 olarak belirlenmiştir. Karışımın daha da fakirleştirilmesi ( $\lambda=2.65$ ) termik verimin azalmasına neden olmuştur. Test sonuçları aynı zamanda karışım fakirleştikçe çevrimsel farklılıkların arttığını, maksimum çevrimsel farklılığın  $\lambda=2.65$  değerinde %5.91 olduğunu göstermiştir. RCCI motorda lamdanın yanma karakteristikleri ve yanma süresi üzerinde kayda değer etkilerinin olduğu görülmüştür.

### Anahtar kelimeler

Reaktif Kontrollü  
Sıkıştırma İle  
Ateşlemeli Yanma;  
Lamda; İndike Termik  
Verim

## The Effects of Lambda on Combustion Characteristics in a Reactive Controlled Compression Ignition (RCCI) Engine

### Abstract

In this study, the influences of lambda on combustion characteristics in a RCCI engine were experimentally investigated. A four stroke, four cylinder, gasoline engine was operated with PRF40 fuel (Primary reference fuel, %40 port injection izooktan, %60 direct injection n-heptan), lambda values of  $\lambda=0.83$ ,  $\lambda=0.88$ ,  $\lambda=1$ ,  $\lambda=1.24$ ,  $\lambda=1.61$ ,  $\lambda=2.65$ , 40°C constant intake air temperature, 1000 rpm engine speed and wide open throttle (WOT). Combustion characteristics, indicated thermal efficiency, network, cumulative heat release and specific fuel consumption (SFC) were investigated on RCCI mode. Rich mixtures caused combustion to retard. Maximum in-cylinder pressure was obtained with  $\lambda=0.83$ . Lower SFC and higher indicated thermal efficiency were obtained at higher lambda. Maximum indicated thermal efficiency was determined as 38.36 % with  $\lambda=1.61$ . Leaner charge mixture caused to decrease of thermal efficiency. The test results also showed that cyclic variations increased with leaner charge mixtures ( $\lambda=2.65$ ) and it was shown that maximum cyclic variation was 5.91 % with  $\lambda=2.65$ . Considerable effects of lambda were seen on combustion characteristics and combustion phase in RCCI engine.

### Keywords

Reactive Controlled  
Compression Ignition;  
Lambda; Indicated  
Thermal Efficiency

© Afyon Kocatepe Üniversitesi

### 1. Giriş

Araştırmacılar hem taşıt kaynaklı egzoz emisyonlarının azaltılması hem de içten yanmalı motorların verimlerini arttırabilmek için

konvansiyonel yanma türlerinin dışında farklı yanma modları üzerinde çalışmaktadırlar. Bu alternatif yanma modları arasında homojen dolgulu sıkıştırma ile ateşlemeli (HCCI), kısmi ön karışimli yanma (PPC),

ön karışımli sıkıştırma ile ateşlemeli yanma (PCCI) ve reaktif kontrollü sıkıştırma ile ateşlemeli yanma (RCCI) bulunmaktadır. Dizel motorlar benzinli motorlara göre sıkıştırma oranları yüksek olduğundan ısı verimleri daha yüksektir. Fakat partikül madde (PM) ve azot oksit ( $NO_x$ ) emisyonları dizel motorların en önemli dezavantajlarıdır (Solmaz, 2015), (Polat, 2016). Bu noktada HCCI motorlar yüksek termik verim ile  $NO_x$  ve is emisyonlarının eş zamanlı azaltılmasına olanak sağlamaktadır. Ancak HCCI yanması üzerinde direkt kontrol bulunmadığından düşük motor yüklerinde ateşlenememe, yüksek motor yüklerinde vuruş problemleri meydana gelmektedir (Uyumaz, 2015), (Çınar vd. 2015a). Bunun sonucunda HCCI motorlar geniş motor yük ve devir aralığında kararlı çalıştırılmamaktadır. HCCI yanmasında yanma üzerinde direkt bir kontrol mekanizması olmadığından silindir basıncı ani bir şekilde artmaktadır. Kendiliğinden tutuşarak yanmaya başlayan karışım ile ani ve hızlı bir ısı yayılımı görülmektedir. Bu aynı zamanda motorun vuruşlu çalışma eğilimini arttırmaktadır. Bu doğrultuda RCCI motorlarda farklı enjeksiyon stratejileri ve yakıtlar ile yanma fazı kontrol edilebilmektedir. RCCI motorlarda emme hattına ve direkt silindir içine enjekte edilen reaktivasyon dereceleri farklı yakıtlar ile yanma kontrol altında tutulmaya çalışılmaktadır. Bu nedenle daha reaktif yakıt direkt silindir içine, daha az reaktif yakıt emme portundan püskürtülerek düşük sıcaklıkta stabil bir yanma gerçekleşebilmektedir. Dolayısıyla  $NO_x$  ve is emisyonları azaltılabilmektedir (Zhao, 2007), (Heywood, 1988) (Zhang et al. 2006), (Reitz and Duraisamy, 2014), (Hanson et al., 2013), (Splitter et al. 2013). RCCI motorlarda lamdanın yanında yanma karakteristiklerini etkileyen bir diğer faktör enjeksiyon zamanlamasıdır. Dört zamanlı, dört silindirli direkt enjeksiyonlu benzinli motorda  $\lambda=2.2$ ,  $\lambda=1.9$ ,  $\lambda=1.7$  değerlerinde çalıştırılan benzinli motorda lamda azaldıkça maksimum silindir basıncının ve ısı yayılımının arttığı görülmüştür. Maksimum indike termik verimin 80 krank mili açısı ( $^{\circ}KMA$ ) enjeksiyon zamanlaması ve  $\lambda=2.2$  değerinde % 42.47 elde edildiği belirlenmiştir (Uyumaz ve Solmaz, 2016). 1.9 litre (L) hacminde dört silindirli bir RCCI motorun termik verim ve yanma

karakteristikleri farklı motor devirlerinde ve yüklerinde incelenmiştir. Konvansiyonel dizel yanmasına göre fren termik verimde maksimum %5 artış,  $NO_x$  emisyonlarında %92 azalma olduğu görülmüştür (Ansari et al. 2016). RCCI motorlarda farklı alternatif yakıt uygulamaları da yapılmaktadır. DME/ $CH_4$  yakıtına hidrojen ilavesinin RCCI motorda etkilerini incelemek için kimyasal kinetiklerin kontrol ettiği üç boyutlu hesaplamalar kullanılmıştır. Yapılan çalışmada simülasyon sonuçlarının çift yakıtlı çalışma şartları altında  $NO_x$  emisyonlarının enjeksiyon stratejisi ve pilot yakıt miktarından etkilendiğini göstermiştir (Liu et al. 2012). Port ve direkt enjeksiyon yapılarak gerçekleştirilen deneylerde RCCI yanmasında kendiliğinden tutuşma süreci sayısal ve deneysel olarak araştırılmıştır. İlk olarak dizel, benzin ve hava karışımının kendi kendine tutuştuğu daha sonra yanma odasının genelinde bir çok noktadan sıcaklık ve basınç artışının düşük sıcaklık bölgesi boyunca alev gelişiminin gerçekleşmesine neden olduğu görülmüştür (Benajes et al. 2014). RCCI yanmasını optimize etmek için yapılan çalışmada yakıt verimi, tutuşma zamanlaması, emisyonlar üzerindeki etkiler analiz edilmiştir. Deney sonuçlarında ilk sıcaklık ve egzoz gazı geri dönüşümünün (EGR) motor performansı ve emisyonlar üzerinde en büyük etkiye sahip oldukları gösterilmiştir. Bununla birlikte EGR oranının azalması ve ilk sıcaklığın artması düzensizlik yoğunluğunu monoton bir şekilde artmasına neden olduğunu görmüşlerdir. Optimum çözümler için daha yüksek giriş basıncı ve % 27 ile % 40 arasında değişen EGR miktarlarının gerekli olduğu belirtilmiştir (Li et al. 2014). HCCI, RCCI ve PPC yanma türleri arasında karşılaştırma için 1500 d/d'da yapılan çalışmada RCCI yanmasının daha uzun sürdüğü ve daha düşük basınç artış oranının elde edildiği görülmüştür. Daha düşük yanma verimi elde edilmesine rağmen ısı kaybının az olmasına bağlı olarak indike termik verimin daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir (Dempsey et al. 2014). Dizel ve benzinli motorlara alternatif olarak içten yanmalı motorlarda düşük sıcaklıktaki yanma reaksiyonları ilgi odağı olmaktadır. Dizel motorlar gibi yüksek sıkıştırma oranı ve gaz keleşiminin kısılmaması HCCI motorların verimini arttırmaktadır. Homojen ön karışımli yakıt hava karışımının seyreltilmesi azot

oksit, duman ve partikül madde emisyonlarının azalmasına yardımcı olmaktadır (Saxena and Bedoya, 2013). HCCI yanmasının kontrol edilebilmesi için uygulanan metotlardan biri değişken kam mekanizmasıdır. Farklı emme havası giriş sıcaklıklarında (20-120°C) ve lamda değerlerinde ( $\lambda=0.5$ - $\lambda=2$ ), 800 ile 1900 devirler arasında çalıştırılan tek silindirli HCCI motorun çalışma aralığının düşük supap kalkma miktarına sahip kamlarla genişletilebileceği görülmüştür (Çınar vd. 2015b). Silindirde tutulan art gaz miktarı karışım kompozisyonunu ve HCCI yanmasını direkt etkilemektedir. 80°C emme havası giriş sıcaklığında ve farklı lamda değerlerinde yapılan deneysel çalışmada 1200 d/d'da emme supap lifti 5.5 mm, egzoz supap lifti 3.5mm olan kamlarla indike termik verimin emme supap lifti 3.5 mm, egzoz supap lifti 3.5mm olan kamlara göre yaklaşık % 17.9 arttığı belirtilmiştir (Çınar et al., 2016). HCCI yanmasında hızlı ısı yayılımı ve ani basınç artış oranı için farklı yakıtlar ve enjeksiyon stratejileri denenmiştir. Tek silindirli direkt enjeksiyonlu dizel motoru %10, %20 ve %30 ön karışım benzin oranları ile maksimum tork devrinde (2200 d/d) çalıştırılarak yanma ve emisyonlar üzerindeki etkileri incelenmiştir. Ön karışimli HCCI yanması ve difüzyon yanması görülmüştür. Deneyler sonucunda % 30 ön karışimli benzin yakıtında önemli derecede vuruntu gerçekleşmiştir. Aynı zamanda  $NO_x$  ve is emisyonlarında % 16 ve % 65 oranında azalma görülmüştür (Can vd. 2009). RCCI yanması emme havası giriş sıcaklığı ve enjeksiyon stratejisinden oldukça etkilenmektedir.

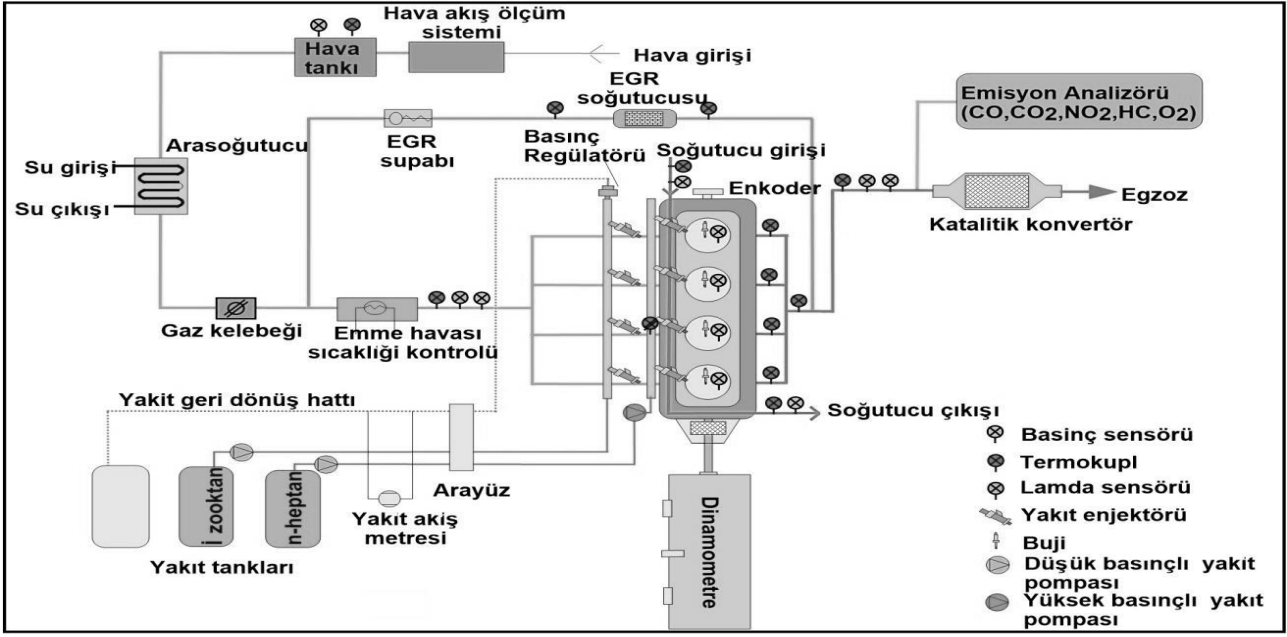
Emme havası giriş sıcaklığı ve ön karışım yakıt oranının RCCI yanma karakteristikleri ve motor performansı üzerindeki etkilerinin deneysel olarak araştırıldığı çalışmada maksimum indike termik verimin 60 °C emme giriş havası sıcaklığında PRF20 yakıtına göre PRF60 yakıtı ile %7.4 artarak %32.3 elde edildiği görülmüştür. Motor performansı için en uygun yakıtın PRF60 olduğu belirlenmiştir (Uyumaz ve Solmaz, 2017).  $\lambda=0.94$ ,  $\lambda=1.03$ ,  $\lambda=1.13$  ve  $\lambda=1.29$ 'da yapılan deneysel çalışmada enjeksiyon zamanlaması ve hava fazlalığının RCCI yanması üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Deney sonuçlarında benzin ve polioksümetilen dimetil eter yakıtları ile stabil ve kontrol edilebilir RCCI

yanmasının sağlandığı görülmüştür. Aynı zamanda yüksek yüklerde stokiometrik oranlarda RCCI yanmasının gerçekleştiğini görmüşlerdir (Tong et al. 2016).

Bu çalışmada dört silindirli, dört zamanlı, direkt enjeksiyonlu benzinli motor  $\lambda=0.83$ ,  $\lambda=0.88$ ,  $\lambda=1$ ,  $\lambda=1.24$ ,  $\lambda=1.61$  ve  $\lambda=2.65$  lamda değerlerinde sabit 40°C emme giriş sıcaklığı ve 1000 d/d motor devrinde RCCI yanma modunda çalıştırılmıştır. RCCI yanmasında lamdanın yanma karakteristikleri üzerindeki etkileri deneysel olarak araştırılmıştır.

## 2. Materyal ve Metot

Lamdanın RCCI yanması ve motor performansına etkilerini incelemek için yapılan deneyler Michigan Technological University'de, Advanced Power System Research Center'da gerçekleştirilmiştir. Deney düzeneğinin görünümü Şekil 1'de görülmektedir. Test sisteminde dinamometreye bağlı deney motorunda lamda, EGR, oranı, gaz kelebeği, konumu, emme havası giriş sıcaklığı, enjeksiyon zamanlaması ve supap zamanlaması gibi parametreler kontrol edilebilmektedir. Deneylerde kullanılan dört zamanlı, dört silindirli 2L hacmindeki GM-ECOTEC benzinli motorun RCCI motora dönüşümü gerçekleştirilmiştir. Deneylerde kullanılan benzinli motorun teknik özellikleri Tablo 1'de görülmektedir. Deney motorunun yüklenebilmesi için 460 beygir gücünde (BG) alternatif akım (AC) ile çalışan dinamometre kullanılmıştır. Deneyler tam yük ve 1000 d/d motor devrinde gerçekleştirilmiştir. Motora alınan emme havasının giriş sıcaklığı 40°C'ye direkt enjeksiyon zamanlaması üst ölü noktadan (ÜÖN) 30 °KMA öncesine sabitlenmiştir. 115A04 model PCB piezo basınç sensörü kullanılarak silindir basıncı tespit edilmiş ve yanma analizi gerçekleştirilmiştir. 104CA model DSP şarj amplifikatörü ile elde edilen veriler yükseltilmiş ve ACAP yanma analiz sistemi kullanılarak silindir basıncı verileri işlenmiştir. dSPACE MicroAutoBox ve RapidPro üniteleri kullanılarak motor çalışma parametreleri kumanda edilebilmektedir. Bununla birlikte MATLAB kodu hazırlanarak basınç verileri analiz edilmiştir.



Şekil 1. Deney düzeneğinin görünümü

Deneyler sonucunda krank açısına bağlı silindir basıncı ölçülebilmekte ısı yayılımı değişimi, termik verim, özgül yakıt tüketimi, yanma başlangıcı, yanma süresi gibi birçok parametre hesaplanabilmekte ve belirlenebilmektedir.

Tablo 1. Deney motorunun teknik özellikleri

Model	GM Ecotec LHU Gen I
Silindir çapı x Kurs [mm]	86 x 86
Silindir sayısı	4
Silindir hacmi [L]	2.0
Sıkıştırma oranı [mm]	9.2:1
Biyel kolu uzunluğu [mm]	145.5
Maksimum güç [kW @6000 d/d]	270
Yakıt enjeksiyon sistemi	Benzinli direkt enjeksiyon
Supap sistemi	Üstten çift eksantrik, 4 supaplı

Silindir içi yanma sonucu açığa çıkan ısı yayılımının analizi için termodinamiğin birinci kanunu esas alınmıştır. Buna göre çevrimde çalışma gazının ideal gaz olduğu kabulü yapılmıştır. Termodinamiğin birinci kanununa dayalı ısı yayılımı aşağıdaki eşitlik ile belirlenmiştir.

$$\frac{dQ}{d\theta} = \frac{k}{k-1} P \frac{dV}{d\theta} + \frac{1}{k-1} V \frac{dP}{d\theta} + \frac{dQ_{heat}}{d\theta} \quad (1)$$

Bu eşitlikte  $dQ$  ve  $d\theta$  ısı yayılımı ve krank açısı değişimini,  $k$ ,  $P$  ve  $V$  sırasıyla özgül ısıların oranını, silindir içi basıncı ve silindir hacmini göstermektedir.

$dQ_{heat}$  transfer edilen ısıyı ifade etmektedir. Yanma verimi aşağıdaki eşitlik ile hesaplanmıştır.

$$\eta_{yanma} = \frac{\int_{t_{bas}}^{t_{son}} \frac{dQ_{gr}}{d\theta} d\theta}{m_f Q_{LHV}} \quad (2)$$

Yukarıdaki eşitlikte  $t_{bas}$  ve  $t_{son}$  krank açısına bağlı olarak yanma başlangıcını ve sonunu,  $\frac{dQ_{gr}}{d\theta}$  krank açısına bağlı olarak toplam ısı yayılımını,  $Q_{LHV}$  yakıtın alt ısı değerini,  $m_f$  bir çevrimde silindire sürülen yakıt miktarını ifade etmektedir (Stone, 1999),(Heywood, 1988),(Zhao, 2007), (Polat, 2015). Deneylerde kullanılan yakıtların özellikleri Tablo 2’de verilmiştir. Deneylerde test yakıtı olarak PRF40 yakıtı seçilmiştir. PRF40 yakıtının RCCI yanması üzerindeki etkileri incelenmiştir. Silindire sürülen toplam yakıt enerjisinin %40’ı porttan izooktan, %60’ı direkt silindir içine n-heptan püskürtülerek gerçekleştirilmiştir. Enjeksiyon stratejisi kullanılan arayüz ile kumanda edilebilmekte ve bu oran bozulmadan deney motoru istenilen lamda değerinde çalıştırılabilmektedir.

Silindire alınan karışımın kompozisyonu, yanma esnasında basınç, sıcaklık değişimleri çevrimden çevrime farklılıklara neden olmaktadır. Hızlı ve ani yanma çevrimsel farklılıkların artmasına neden olabilmektedir. Bu nedenle çevrimsel farklılıkların %10'u geçmemesi istenmektedir (Heywood, 1988). İndike ortalama efektif basınç çevrimsel farklılıklar katsayısı aşağıda belirtilen eşitlik ile hesaplanmıştır.

$$COV_{imep} = \frac{\sigma_{imep}}{\bar{X}} \times 100 \quad (3)$$

Bu eşitlikte,  $\sigma_{imep}$  50 çevrimin ortalama efektif basınç değerlerinin standart sapmasını,  $\bar{X}$  ortalama efektif basınçların ortalamasını ifade etmektedir.  $\bar{X}$  ve  $\sigma_{imep}$  değerleri sırasıyla aşağıdaki eşitliklerle hesaplanmaktadır.

$$\bar{X} = \sum_{i=1}^n \frac{X_i}{n_i} \quad (4)$$

Bu eşitlikte  $X_i$  ortalama efektif basınçların toplamını,  $n_i$  veri sayısını göstermektedir.

$$\sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 / (n_i - 1)} \quad (5)$$

Tablo 2. İzooktan ve n-heptan yakıtlarının özellikleri (Anonymous, 2005)

	İzooktan	n-heptan
Araştırma oktan sayısı	100	0
Kimyasal formülü	C <sub>8</sub> H <sub>18</sub>	C <sub>7</sub> H <sub>16</sub>
Molekül ağırlığı [gr/mol]	114.23	100.21
Yoğunluk [kg/m <sup>3</sup> @15.4 °C]	692	695
Kaynama noktası [K]	372.2-372.6	371
Alt ısı değeri [kJ/kg]	44310	44566

Testler tam gaz kelebek açıklığında, (GKA) sabit emme havası giriş sıcaklığı ve ÜÖN'dan 30 °KMA önce direkt enjeksiyon zamanlamasında, 1000 d/d motor devrinde RCCI yanma modunda gerçekleştirilmiştir. λ'nın RCCI yanması ve performans karakteristikleri üzerindeki etkileri deneysel olarak incelenmiştir.

Tablo 3. Motor çalışma parametreleri

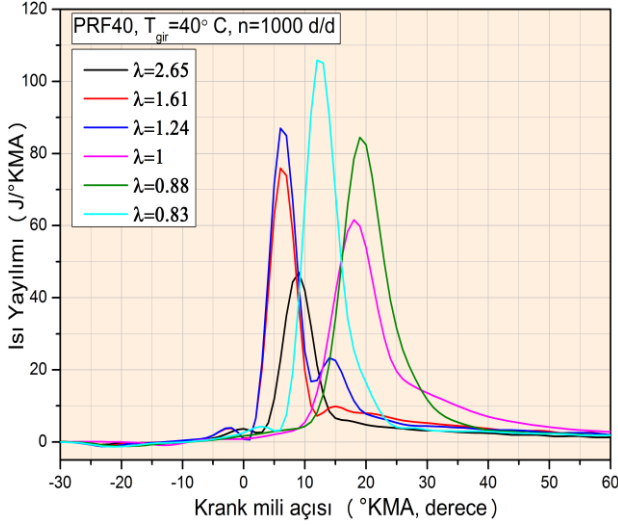
Yakıt	PRF40
Motor yükü	%100 GKA
Motor devri [d/d]	1000
Emme havası giriş sıcaklığı [°C]	40
Lamda	0.83, 0.88, 1, 1.24,
Egzoz supabı kapanma zamanlaması [ÜÖN'dan önce, °KMA]	22
Emme supabı açılma zamanlaması [ÜÖN'dan önce, °KMA]	22
ÜÖN öncesi yakıt püskürtme avansı [ÜÖN'dan önce, °KMA]	30

Deneysel çalışmalar Tablo 3'de verilen motor çalışma şartlarında gerçekleştirilmiştir.

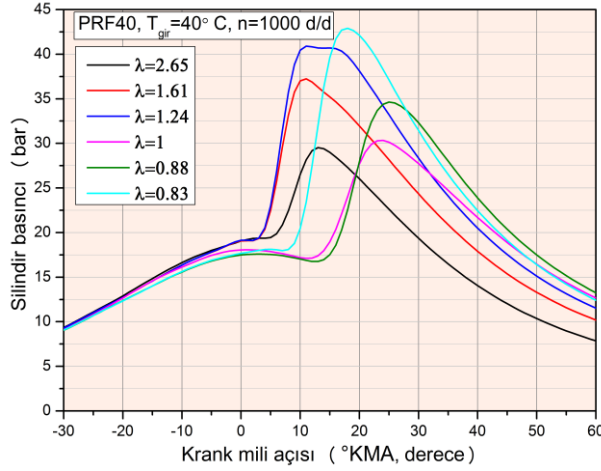
### 3. Bulgular

Yapılan deneysel çalışmada RCCI yanma şartlarında tam yükte referans yakıt PRF40 ile farklı lamda değerlerinde gerçekleştirilmiştir. Çevrime alınan yakıt % 40 izooktan port enjeksiyon, %60 n-heptan silindir içine direkt enjeksiyon şeklinde motora alınmıştır. Şekil 2'de RCCI yanması sonucu lamdanın silindir içi basıncın krank açısına bağlı değişimi görülmektedir. Maksimum silindir içi basınç λ=0.83 ile elde edilmiştir. Zengin karışımda silindire verilen yakıt enerjisi artmakta ve daha yüksek silindir içi basınç elde edilmektedir. Şekil 2 incelendiğinde zengin karışımlarda maksimum silindir içi basıncın daha geç elde edildiği görülmektedir. Zengin karışım oranlarında (λ=0.83, λ=0.88) silindirde daha fazla yakıtın bulunması ile yanma daha geç tamamlanmaktadır. Bununla birlikte karışımın fakirleşmesi ile maksimum silindir içi basıncın daha önce elde edildiği ve zengin karışımlara göre maksimum silindir içi basıncının arttığı görülmektedir. Lamda azaldıkça elde edilen maksimum silindir içi basınç artmaktadır. Yanma odasında yakıt enerjisi arttıkça maksimum silindir içi basınç ve ısı dağılımı artmaktadır (Uyumaz ve Solmaz, 2016). Bir başka deneysel çalışmada lamda azaldıkça ve enjeksiyon başlangıcı avansa alındıkça maksimum silindir içi basınç daha önce elde edilmiştir (Tong et al. 2016). Silindir içine sevk edilen yakıt enerjisi miktarı arttığında silindir içi basınç ve ısı yayılımı artmaktadır. Sonuçta bir çevrimde silindirde açığa çıkan ısı enerjisi artmaktadır (Qian et al. 2015). Yapılan modelleme çalışmalarında da RCCI yanmasında benzin oranı arttıkça yanmanın kontrol edilebileceği

görülmüştür. Biyodizel ve benzin yakıtları ile yapılan RCCI yanma modellemesinde benzin oranı arttıkça daha homojen karışımın sağlandığı ve  $\text{NO}_x$  emisyonlarının azaldığı görülmüştür. Aynı zamanda benzin oranı arttıkça silindir içi basıncın arttığını ifade etmişlerdir (Li et al. 2015).



Şekil 2. Lamdanın silindir basıncına etkisi

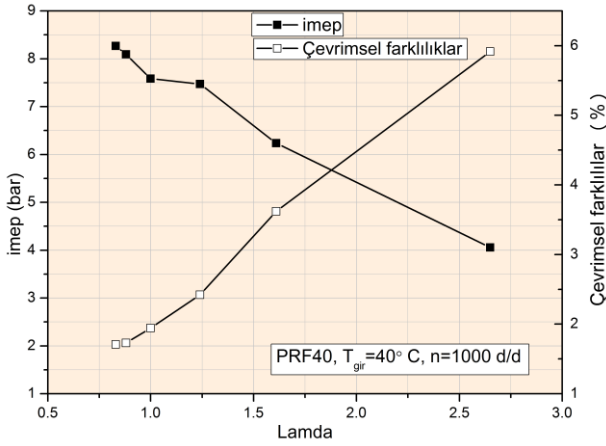


Şekil 3. Lamdanın ısı yayılımına etkisi

RCCI yanması düşük sıcaklıklarda meydana gelen bir yanma türüdür. HCCI yanmasından farklı olarak hızlı bir şekilde artış gösteren ısı yayılımı RCCI yanmasında görülmemektedir. Karışım farklı reaktivasyon dereceli yakıtlar ve karışım kompozisyonu ile kontrol edilebilmektedir. Şekil 3'de RCCI yanmasında lamdanın ısı yayılımına etkisi görülmektedir. Maksimum ısı yayılımı  $\lambda=0.83$  ile elde edilmiştir. Silindir basıncına benzer şekilde karışım fakirleştikçe yanma avansa alınmaktadır.

Zengin karışım oranlarında ( $\lambda=0.83, \lambda=0.88$ ) reaksiyona giren yakıt kütleindeki artışa bağlı olarak yanma odasına salınan ısı enerjisi artmaktadır. Stokiyometrik ( $\lambda=1$ ) karışım oranlarına yakın lamda değerlerinde ısı yayılımı kısmen azalmakta, karışım biraz fakirleşince ısı yayılımı artmaktadır. İndike ortalama efektif basınç (imep) motor performansını gösteren önemli parametrelerden birisidir. Krank açısına bağlı olarak bir çevrim boyunca piston üzerine uygulanan basınçların ortalamasını ifade etmektedir. Şekil 4 RCCI yanmasında imep ve imep değerlerine bağlı çevrimler arası farkların değişimini göstermektedir. Lamda arttıkça silindire alınan yakıt enerjisi miktarı ve imep azalmaktadır. Benzer sonuçlar literatürde elde edilmiş lamda arttıkça imep değerlerinin azaldığı görülmüştür.  $80^\circ\text{KMA}$  enjeksiyon zamanlamasında  $\lambda=1.9$  ve  $\lambda=2.2$  değerlerinde sırasıyla 5.51 bar ve 4.92 bar imep elde edilmiştir. (Uyumaz ve Solmaz, 2016). Maksimum imep  $\lambda=0.83$  değerinde 8.26 bar olarak belirlenmiştir. Zengin karışım oranlarında yanma odasındaki yakıt moleküllerinin yoğunluğu oksidasyon reaksiyonlarını iyileştirmektedir. İçten yanmalı motorlarda çevrimsel farklılıkların %10'un altında olması istenmektedir. (Heywood, 1988). Bu şartlar altında motor kararlı çalışabilmektedir. Silindire alınan karışımın kompozisyonu ve termodinamik şartlar her zaman stabil kalamamakta, çevrimden çevrime değişiklikler görülmektedir. Şekil 4 incelendiğinde çevrimsel farklılıkların tüm lamda değerleri için % 10'un altında olduğu görülmektedir. Lamda arttıkça imep değerlerine bağlı çevrimsel farklılıklar artmaktadır. Zengin karışım oranlarında ( $\lambda=0.83, \lambda=0.88$ ) yanma odasında oksijen ile yakıt molekülleri daha kolay buluşabilmektedir. Bu noktada silindirde açığa çıkan ısı miktarı ve sıcaklık yükselmekte, yanma odasının genelinde stabil bir yanmanın olduğunu söylemek mümkün olmaktadır (Uyumaz ve Solmaz, 2016), (Curran et al. 2013). Bir başka deneysel çalışmada RCCI yanması 4.6 bardan 14.6 bara kadar değişen basınçlarda elde edilmiştir. Bununla birlikte 1300 d/d motor devrinde yapılan deneyde hava-yakıt oranı arttıkça imep değerlerinin azaldığı görülmüştür (Kokjohn et al. 2011). Direkt enjeksiyon yapılan yakıt miktarı arttıkça imep değerleri artmaktadır (Hanson and Reitz, 2013).

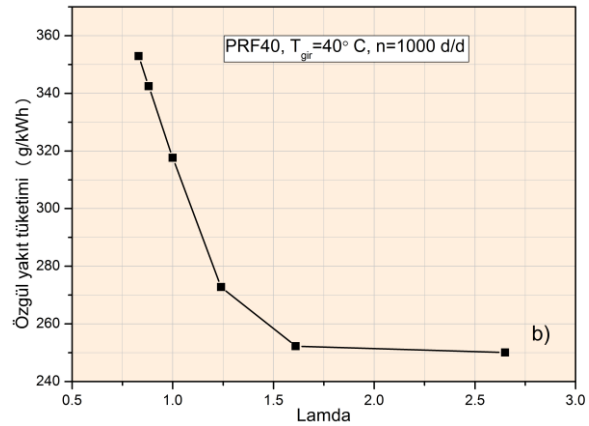
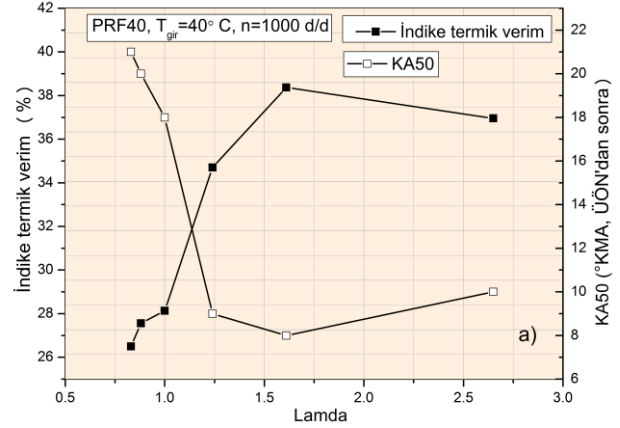
Maksimum çevrimsel farklılıklar %5.91 ile  $\lambda=2.65$  değerinde hesaplanmıştır.



Şekil 4. İmep ve çevrimsel farklılıkların değişimi

Şekil 5-a'da RCCI yanmasında lamdanın indike termik verim, silindir içi karışımın %50'sinin yanmasını tamamladığı krank açısı (KA50) ve özgül yakıt tüketimi üzerindeki etkileri görülmektedir. Termik verim içten yanmalı motorlarda silindire sürülen enerjinin ne kadarının piston üzerine etkileyen basınca dönüştüğünün bir ifadesidir. İçten yanmalı motorlarda termik verim karışımın biraz fakirleşmesiyle artış göstermektedir. Fakir karışım oranlarında yeterli oksijen ile silindire verilen yakıtın büyük bir kısmı oksidasyon ile yanmasını tamamlamaktadır. Sonuçta termik verim artmaktadır. Fakat çok yüksek lamda değerlerinde ( $\lambda=1.61$ ,  $\lambda=2.65$ ) yakıttan elde edilen ısı enerjisinin azalmasına bağlı olarak termik verim yeniden azalma eğilimine girmektedir. Yapılan deneylerde maksimum indike termik verim  $\lambda=1.61$  değerinde %38.36 olarak belirlenmiştir. KA50 değeri silindire sürülen karışımın yarısının yanmasını tamamladığı krank açısı olarak ifade edilir. Bu noktada daha yüksek termik verim için KA50 değerinin üst ölü noktayı biraz geçtikten sonra olması (5-10°KMA) istenmektedir. Bu nedenle KA50 ile termik verim arasında yakın bir ilişki bulunmaktadır. Şekil 5-a'da görüldüğü gibi KA50 değerinin 5-10°KMA olduğu noktalarda termik verimin yüksek olduğu görülmektedir. Şekil 5-b ise lamdaya bağlı özgül yakıt tüketimi değerlerini göstermektedir. Lamda arttıkça indike termik verim artmakta, indike özgül yakıt tüketimi azalmaktadır. Birim zamanda birim güç üretmek için motorun tükettiği yakıt miktarı

azalmaktadır. Farklı direkt enjeksiyon zamanlamalarında  $\lambda=2.2$ ,  $\lambda=1.9$  ve  $\lambda=1.7$ 'de yapılan deneyde maksimum termik verim  $\lambda=2.2$ 'de elde edilmiştir. Hava fazlalığı arttıkça termik verimin arttığı görülmüştür (Uyumaz ve Solmaz, 2016).

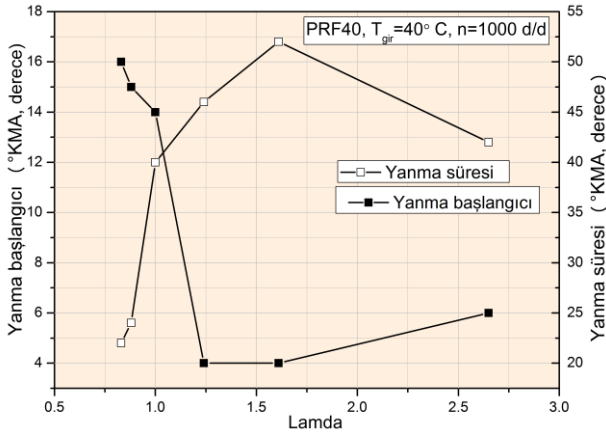


Şekil 5. RCCI yanmasında lamdanın indike termik verim, KA50 ve özgül yakıt tüketimi üzerindeki etkileri

Yanma karakteristiklerini gösteren diğer parametreler yanma başlangıcı ve yanma süresidir. Yanma başlangıcı ve yanma süresinin değişimi Şekil 6'da görülmektedir. Yakıtın krank açısına bağlı olarak yanma başlangıcı ve yanma süresinin tanımlanması için 0 ile 100 arasında normalize edilmesi hakkında bize bilgi verir. Karışımın %10'unun yanmasını tamamladığı % 0-10 alev gelişim açısı (KA10), karışımın %90'ının yanmasını tamamladığı açı KA90 olarak ifade edilirse yanma süresi krank açısına bağlı olarak KA10 ve KA90 arasındaki zaman dilimi kadar sürer. Yüzde cinsinden %10-90 hızlı yanma açısı olarak ifade edilmektedir (Gürbüz et al. 2013).

Yanma başlangıcı ısı yayılımının krank açısına göre pozitif değer aldığı nokta olarak da

belirlenebilmektedir. Fakat art yanma ve silindir yüzeylerinden gerçekleşen ısı kayıpları nedeniyle yanmanın sonunu belirlemek güçtür. Bu çalışmada alev gelişim açısı KA10 olarak kabul edilmiştir. Lamda arttıkça stokiyometrik orana doğru yanma başlangıcı azalmış daha fakir karışımlarda yanma daha geç başlamıştır. Tutuşma gecikmesi arttıkça yanma daha geç başlamaktadır. Başka bir deneysel çalışmada eşdeğerlik oranı arttıkça tutuşma gecikmesi süresinin azaldığı görülmektedir (Splitter et al. 2011), (Walton et al. 2006).



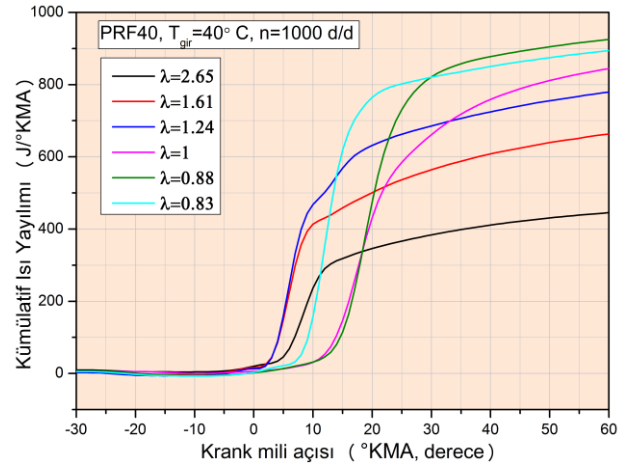
Şekil 6. Yanma başlangıcı ve yanma süresinin değişimi

Tutuşmanın başlayabilmesi için yanma odasında yeterli yoğunlukta bulunan yakıt tanecikleri ile yanma daha kolay başlayabilmektedir. Oksijen ile yakıt moleküllerinin karşılaşma ihtimali artmaktadır. Bu durum kimyasal oksidasyon reaksiyonlarının daha erken başlamasına ve alev hızının artmasına neden olmaktadır. Bunun tersine lamda arttıkça yanma süresi uzamaktadır. Kümülatif ısı yayılımı krank açısına göre ısı yayılımı değerlerinin birbirine eklenmesi ile elde edilir. Elde edilen kümülatif ısı yayılımı değerleri aşağıda belirtilen eşitlik ile 0 ile 1 arasında normalleştirilir. Dolayısıyla % cinsinden silindir içi karışımın yanmasını tamamladığı aşamalar belirlenebilir. Krank açısına bağlı n tane kümülatif ısı yayılımı değeri aşağıdaki eşitlik ile normalleştirilebilir.

$$X_n^i = \frac{\text{İlk değer} - \text{Minimum değer}}{\text{Maksimum değer} - \text{Minimum değer}} \quad (6)$$

Yukarıda belirtildiği gibi kümülatif ısı yayılımı normalize edildiğinde yanma aşamaları ve yanmış kütle oranı hakkında bize bilgi verir. Kümülatif ısı

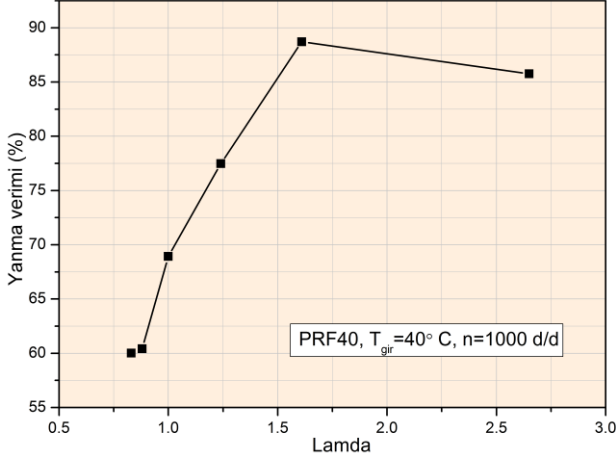
yayılımı krank açısına bağlı olarak ısı dağılımlarının ardışık toplanması ile elde edilmektedir. Dolayısıyla yanma odasında açığa çıkan toplam ısı ve yanmış kütle miktarı hakkında bilgi vermektedir. Şekil 7 krank açısına bağlı kümülatif ısı yayılımı görülmektedir. Karışım zenginleştikçe silindire sürülen yakıt enerjisi ve ısı yayılımı artmakta daha yüksek kümülatif ısı elde edilmektedir. Minimum kümülatif ısı  $\lambda=2.65$  değerinde elde edilmiştir. Düşük lamda değerlerinde ( $\lambda=0.83, \lambda=0.88$ ) yanma odasında alev yayılma hızının artması sonucu yanma iyileşmekte kümülatif ısı yayılımı artış göstermektedir. Şekil 8 lamdaya bağlı yanma veriminin değişimini göstermektedir. Yanma verimi karışım kompozisyonu ve yanma odasında silindir içi yanmış gaz sıcaklığına bağlı olarak değişmektedir. Lamda arttıkça termik verime benzer şekilde yakıt enerjisinin büyük bir kısmı net işe dönüşmekte termik verim ve yanma verimi artmaktadır.



Şekil 7. Kümülatif ısı yayılımı

Çok fakir karışımlarda ( $\lambda=2.65, \lambda=1.61$ ) silindire sürülen stokiyometrik miktardan daha fazla yada az yakıt miktarı yanma verimini azaltmaktadır maksimum yanma verimi  $\lambda=1.61$  değerinde % 88.71 elde edilirken minimum yanma verimi  $\lambda=0.83$  lamda değerinde % 60.01 hesaplanmıştır. Lamdanın artışı ile yanma odasındaki yakıt molekülleri oksidasyon için yeterli miktarda oksijen ile buluşabilmekte, tutuşmakta ve yanmasını tamamlayabilmektedir (Zhao, 2007), (Heywood, 1988), (Stone, 1999). Direkt silindir içine toplam yakıt enerjisinin n-heptan ile % 60'ının püskürtülmesi ile yanma hızı artış göstermektedir. Bu durumda karışımın bir miktar fakirleştirilmesi ile kimyasal oksidasyon

reaksiyonları ve yanmanın kalitesi iyileşmekte termik verim ve yanma verimi artmaktadır. Benzer sonuçlar farklı deneysel çalışmalarda elde edilmiştir. Hava fazlalığı arttıkça yanma verimi artmaktadır (Uyumaz ve Solmaz, 2016).



Şekil 8. Yanma veriminin değişimi

#### 4. Tartışma ve Sonuç

Bu çalışmada lamdanın RCCI yanma karakteristikleri üzerindeki etkileri deneysel olarak araştırılmıştır. Lamda azaldıkça maksimum silindir basıncının arttığı, ve maksimum silindir basıncının daha önce elde edildiği görülmüştür. Benzer şekilde düşük lamda değerlerinde ısı yayılımı artış göstermiştir. Karışımın fakirleştirilmesi ile indike termik verim artmaktadır. Maksimum indike termik verim  $\lambda=1.61$  değerinde %38.36 olarak belirlenmiştir. Ancak  $\lambda=2.65$ 'de indike termik verim azalmıştır. Bununla birlikte özgül yakıt tüketimi hava fazlalığı arttıkça azalmaktadır. Minimum özgül yakıt tüketimi 250.1 g/kWh ile  $\lambda=2.65$ 'te elde edilmiştir. Lamda arttıkça RCCI yanma süresi artmış,  $\lambda=2.65$ 'de azalmıştır. Zengin karışımlarda ( $\lambda=0.83$ ,  $\lambda=0.88$ ) kümülatif ısı yayılımı artmıştır. Maksimum yanma verimi  $\lambda=1.61$ 'de %88.71 olarak belirlenmiştir. Karışımın daha fazla fakirleştirilmesi ile RCCI yanma verimi azalmıştır. Yapılan deneyler sonucunda optimum yanma özellikleri için RCCI motorun karışımın biraz fakirce olduğu lamda değerlerinde ( $\lambda=1.24$ ,  $\lambda=1.61$ ) çalıştırılması gerektiği görülmüştür. Sonuç olarak RCCI yanmasının lamda değerinden hassas bir şekilde etkilendiği, yanma fazının kontrol edilebileceği görülmüştür.

#### Teşekkür

Bu çalışmanın yapılabilmesi için Hamit SOLMAZ 2219/A Doktora sonrası araştırma bursu kapsamında TÜBİTAK tarafından desteklenmiştir. Ayrıca deney düzeneğinin kurulması için "United States National Science Foundation (Grant No:1434273)" tarafından finansal destek sağlanmıştır. Yazarlar TÜBİTAK ve United States National Science Foundation'a teşekkür eder.

#### Kaynaklar

Ansari, E., Poorghasemi, K., Irdmousa, B.K., Shahbakhti, M., Naber, J., 2016. Efficiency and Emissions Mapping of a Light Duty Diesel - Natural Gas Engine Operating in Conventional Diesel and RCCI Modes. SAE Technical Paper 2016-01-2309.

Anonymous, 2005. 2,2,4-2-2-4Trimethylpentane-compound summary, PubChem Compound. USA: National Center for Biotechnology Information 26 March Identification and Related Records, (Retrieved March 2012).

Benajes, J., Molina, S., García, A., Belarte, E., Vanvolsem, M. 2014. An investigation on RCCI combustion in a heavy duty diesel engine using incylinder blending of diesel and gasoline fuels. Applied Thermal Engineering, 63, 66-76.

Can O., Cinar C., Sahin F., 2009. Effects of Premixed Gasoline Charge on HCCI-DI Engine Combustion and Exhaust Emissions, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 24, 2, 229-236.

Cinar, C., Uyumaz, A., Solmaz, H., Topgul, T. 2015. Effects of Valve lift on the Combustion and Emissions of a HCCI Gasoline Engine. Energy Conversion and Management, 94, 159-168.

Cinar, C., Uyumaz, A., Solmaz, H., Sahin, F., Polat, S., Yılmaz, E. 2015. 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 Processing Technology, 130, 275-81.

Cinar, C., Uyumaz, A., Polat, S., Yılmaz, E., Can, Ö., Solmaz, H. 2016. Combustion and Performance Characteristics of an HCCI Engine Utilizing Trapped Residual Gas Via Reduced Valve Lift. Applied Thermal Engineering, 100, 586-594.

Curran, S., Hanson, R., Wagner, R., 2013. Efficiency and Emissions Mapping of RCCI in a Light-Duty Diesel Engine. SAE Paper 2013-01-0289.

Dempsey, A., Walker, N., Gingrich, E., Reitz, RD., 2014. Comparison of Low Temperature Combustion Strategies

- For Advanced Compression Ignition Engines With a Focus on Controllability. *Combustion Science Technology*, 86, 2, 210-41.
- Gürbüz, H., Buran, D. and Akçay, İ.H., (2013). An experimental study on performance and cyclic variations in a spark ignition engine fuelled with hydrogen and gasoline. *J. of Thermal Science and Technology*, 33, 1, 33-41.
- Hanson, R., Curran, S., Wagner, R., 2013. Effects of Biofuel Blends on RCCI Combustion in a Light-Duty, Multi-Cylinder Diesel Engine. SAE International 2013-01-1653.
- Hanson, R., Reitz, R., 2013. Transient RCCI Operation in a Light-Duty Multi-Cylinder Engine. SAE Paper 2013-24-0050.
- Heywood, J. B., 1988. *Internal Combustion Engine Fundamentals*. New York: McGraw- Hill.
- Kokjohn, S.L., Hanson, R.M., Splitter, D.A., Reitz, R.D., 2010. Fuel reactivity controlled compression ignition (RCCI): a pathway to controlled high-efficiency clean combustion. *International Journal of Engine Research*. 12, 209-226.
- Li, J., Yang, W.M., An, H., Zhao, D., 2015. Effects of fuel ratio and injection timing on gasoline/biodiesel fueled RCCI engine: A modeling study. *Applied Energy*, 155, 59-67.
- Li, Y., Jia, M., Chang, Y., Liu, Y., Xie, M., Wang, T., Zhou, L., 2014. Parametric Study and Optimization of a RCCI (Reactivity Controlled Compression Ignition) Engine Fueled With Methanol and Diesel. *Energy*, 65, 319-332.
- Liu, J., Yang, F., Wang, H., Ouyang, M., 2012. Numerical Study of Hydrogen Addition to DME/CH<sub>4</sub> Dual Fuel RCCI Engine. *International Journal of Hydrogen*, 37, 8688-8697.
- Polat, S., 2016. An Experimental Study on Combustion, Performance and Exhaust Emissions in a HCCI Gasoline Engine Fueled with Diethyl Ether/ Ethanol Fuel Blends. *Fuel Processing Technology*, 143, 140-150.
- Polat, S., 2015. HCCI (Homojen Dolgulu Sıkıştırma İle Ateşlemeli) Bir Motorda Çalışma Parametrelerinin Yanmaya Etkilerinin İncelenmesi. Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Qian, Y., Ouyang, L., Wang, X., Zhu, L., Lu, X., 2015. Experimental studies on combustion and emissions of RCCI fueled with n-heptane/alcohols fuels. *Fuel*, 162, 239-250.
- Reitz, R.D., Duraisamy, G., 2014. Review of High Efficiency and Clean Reactivity Controlled Compression ignition (RCCI) Combustion in Internal Combustion Engines. *Progress in Energy and Combustion Science*, in-press. 1-60.
- Saxena, S., Bedoya, I.D., 2013. Fundamental Phenomena Affecting Low Temperature Combustion and HCCI Engines, High Load Limits and Strategies For Extending These Limits. *Progress in Energy and Combustion Science*, 39, 457-488.
- Solmaz, H., 2015. Combustion, Performance and Emission Characteristics of Fusel Oil in a Spark Ignition Engine. *Fuel Processing Technology*, 133, 20-28.
- Splitter, D., Wissink, M., DelVescovo, D., Reitz, R., 2013. RCCI Engine Operation Towards 60% Thermal Efficiency. SAE International, 2013-01-0279.
- Splitter, D., Hanson, R., Kokjohn, S., Wissink, M., Reitz, R., 2011. Injection Effects in Low Load RCCI Dual-Fuel Combustion. SAE Paper 2011-24-0047.
- Stone, R., 1999. *Introduction to Internal Combustion Engines*. Macmillan Press Ltd, ISBN 0-333-74013-0, Tesseraux, I.; Toxicoll, Lett., 149, 295-300, (2004).
- Tong, L., Wang, H., Zheng Z., Reitz, R., Yao, M., 2016. Experimental study of RCCI combustion and load extension in a compression ignition engine fueled with gasoline and PODE. *Fuel*, 181, 878-886.
- Uyumaz, A., Solmaz, H., 2016. RCCI Bir Motorda Enjeksiyon Zamanlaması ve Lamdanın Yanma ve Performans Karakteristikleri Üzerindeki Etkilerinin Deneysel İncelenmesi. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part:C, Tasarım ve Teknoloji*, 4(4):299-308.
- Uyumaz, A., Solmaz, H., 2017. Emme Havası Giriş Sıcaklığı ve Ön Karışimli Yakıt Oranının RCCI Yanma Karakteristiklerine ve Motor Performansına Etkileri. *Politeknik Dergisi*, 20 (3) : 689-698.
- Uyumaz, A., 2015. An Experimental Investigation Into Combustion and Performance Characteristics of an HCCI Gasoline Engine Fueled With n-heptane, Isopropanol and n-butanol Fuel Blends at Different Inlet Air Temperatures. *Energy Conversion and Management*, 98, 199-207.
- Walton, S.M., He, X., Zigler, B.T., Wooldridge, M.S., Atreya, A., 2006. An Experimental Investigation of Iso-octane Ignition Phenomen. Department of Mechanical Engineering, University of Michigan, 2350 Hayward St., Ann Arbor, MI, USA 48109-2125. Submitted as a Full-Length Article to *Combustion and Flame* January 27, 2006.

Zhao, H. 2007. HCCI and CAI Engines For the Automotive Industry. Cambridge England: Woodhead Publishing Ltd.

Zhang, Y., He, BQ., Xie, H., Zhao, H., 2006. The Combustion and Emission Characteristics of Ethanol on a Port Fuel Injection HCCI Engine. SAE International Technical Papers, 2006-01-0631.