



RCCI Bir Motorda Enjeksiyon Zamanlaması ve Lamdanın Yanma ve Performans Karakteristikleri Üzerindeki Etkilerinin Deneysel İncelenmesi

Ahmet UYUMAZ^{1, *}, Hamit SOLMAZ²

¹*Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Otomotiv Teknolojisi Programı, BURDUR*

²*Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Otomotiv Mühendisliği Bölümü, ANKARA*

Başvuru: 17/08/2016

Düzeltilme: 24/10/2016

Kabul: 17/11/2016

ÖZET

Bu çalışmada, dört zamanlı, dört silindirli, direkt püskürtmeli reaktif kontrollü sıkıştırma ile ateşlemeli (RCCI) bir motorda enjeksiyon zamanlaması ve lamda değişiminin yanma ve performans karakteristikleri üzerindeki etkileri deneysel olarak incelenmiştir. Bu amaçla direkt püskürtmeli RCCI motorda porttan izooktan yakıtı, direkt silindir içerisine n-heptan yakıtı ÜÖN'dan 100, 80, 60, 50, 40, 30, 20 °KA önce püskürtülerek RCCI yanması üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Tam yükte, 1000 d/d'da, 40°C emme havası giriş sıcaklığında, sabit supap zamanlamasında ve farklı lamda değerlerinde ($\lambda=2.2$, $\lambda=1.9$, $\lambda=1.7$) yapılan deneylerde enjeksiyon zamanlaması avansa alındıkça maksimum silindir içi basıncın daha erken elde edildiği ve arttığı görülmüştür. Aynı zamanda, lamda azaldıkça maksimum silindir basıncının ve ısı dağılımının arttığı gözlemlenmiştir. Enjeksiyon zamanlaması avansa alındıkça indike termik verim belli bir değere kadar artış göstermiş, daha fazla avansa alındığında indike termik verimdeki artış azalmıştır. Maksimum indike termik verim 80°KA enjeksiyon zamanlaması ve $\lambda=2.2$ değerinde % 42.47 elde edilmiştir.

Anahtar kelimeler: Reaktif kontrollü sıkıştırma ile ateşlemeli yanma, Yanma, Enjeksiyon zamanlaması, Yanma verimi, Lamda

Experimental Investigation of The Effects of Lambda and Injection Timing on Combustion and Performance Characteristics in a RCCI Engine

ABSTRACT

In this study, the effects of injection timing and lambda were investigated experimentally on combustion characteristics in a four stroke, four cylinder, direct injection RCCI engine. For this purpose, isoootane was injected from the inlet port and n-heptane was injected directly into the cylinder at 100, 80, 60, 50, 40, 30, 20 °CA, BTDC injection timings in order to see the effects of injection timings on RCCI combustion. Tests were performed at 1000 rpm engine speed, 40°C inlet air temperature, constant valve timing and different lambda values of $\lambda=2.2$, $\lambda=1.9$, $\lambda=1.7$. It was seen that the maximum in-cylinder pressure increased and advanced with the advance of injection timing. In addition, the maximum in-cylinder pressure and heat release increased with the decrease of lambda. The indicated thermal efficiency increased until a certain injection timing value and then the increase of the indicated thermal efficiency decreased with the advance of injection timing. The maximum indicated thermal efficiency was obtained as 42.47 % at 80°CA injection timing and $\lambda=2.2$.

Keywords: RCCI, Combustion, Injection timing, Combustion efficiency, Lambda

1.GİRİŞ (INTRODUCTION)

Araştırmacılar içten yanmalı motorlarda hem termik verimi yükseltmek hem de zararlı egzoz gazlarını azaltmak amacıyla düşük sıcaklık reaksiyonları ile gerçekleşen yanma türleri üzerinde çalışmalarını sürdürmektedirler. Bu doğrultuda homojen dolgu sıkıştırma ile ateşlemeli (HCCI) motorlar büyük ilgi görmektedir. Fakat HCCI motorlarda yüksek yüklerde görülen kararsız çalışma, vuruntu, yanmanın kontrol edilememesi ve sınırlı motor çalışma aralığı gibi dezavantajlar bulunmaktadır [1-7]. Emme havası giriş sıcaklığı, EGR, sıkıştırma oranı, hava/yakıt oranı ve yakıt özellikleri gibi değişkenlerle HCCI yanması kontrol edilmeye çalışılmaktadır. Bu parametreler içerisinde yakıt özellikleri kendi kendine tutuşma ve motor yük aralığının genişletilmesinde en önemli kontrol parametrelerinden biridir [8-10]. İçten yanmalı motorlardaki HCCI uygulaması ile ilgili bahsi geçen dezavantajları ortadan kaldırmak için son zamanlarda araştırmacıların ilgisini çeken yanma modu reaktif kontrollü sıkıştırma ile ateşlemeli (RCCI) yanma modudur. RCCI yanmasında reaktivite dereceleri birbirinden farklı iki yakıt kullanılmaktadır. Porttan ve direkt silindir içerisine yapılan püskürtme ile karışım kontrollü bir yanma meydana gelebilmektedir. Bu noktada yanma fazı yakıtların enjeksiyon zamanlamaları ile kontrol edilebilmektedir. Farklı reaktivite özelliklerine sahip yakıtların silindirde oluşturduğu karışım ile yanma fazı kontrol edilebilmekte, NO_x ve is emisyonları önemli derecede azaltılabilmektedir. Bununla birlikte konvansiyonel yanma modlarına göre RCCI motorların termik verimleri yüksektir [11-16]. Liu ve arkadaşları [17] çalışmalarında DME/CH₄ yakıtına hidrojen ilavesinin RCCI motorda etkilerini incelemek için kimyasal kinetiklerin kontrol ettiği üç boyutlu hesaplamalar kullanmışlardır. Yeni bir DME oksidasyon mekanizması denenmiştir. H₂ ilavesiyle tutuşma zamanlaması avansa alınmış ve maksimum silindir basıncı artmıştır. Hidrojenin daha sonraki yanma aşamalarından çok yanmanın başlangıcında büyük etkiye sahip olduğunu görmüşlerdir. H₂ ilavesiyle CH₄ ile elde edilen emisyonların azaldığını görmüşlerdir. Fakat alevin dolgu boyunca meydana gelmediğini ve CH₄ ile elde edilen emisyonların yüksek olduklarını görmüşlerdir. CO emisyonunun ön karışımli CH₄ yakıtının yanması ile elde edildiğini görmüşlerdir. Hidrojen ilavesi ile NO emisyonları artmıştır. Simulasyon sonuçları çift yakıtlı çalışma şartları altında NO_x emisyonlarının enjeksiyon stratejisi ve pilot yakıt miktarından etkilendiğini göstermiştir.

Saxena ve Bedoya yaptıkları literatür araştırması çalışmasında [18] dizel ve benzinli motorlara alternatif olarak içten yanmalı motorlarda düşük sıcaklıktaki yanma reaksiyonlarının büyük ilgi çektiğini görmüşlerdir. Bunlardan bir tanesi ön karışımli homojen hava/yakıt karışımını kullanan benzinli ve dizel motorların ortak avantajlarına sahip HCCI motorlardır. Dizel motorlara benzer şekilde yüksek sıkıştırma oranı ve gaz keleşinin kısılmaması HCCI motorların verimini arttırmaktadır. Homojen ön karışımli yakıt hava karışımının seyreltilmesi azot oksit, duman ve partikül madde emisyonlarının azalmasına yardımcı olmaktadır. Sonuçta, HCCI motorlar dizel motorlarla karşılaştırıldığında daha yüksek verim sağlayabilecek kapasiteye sahiptir. Aynı zamanda pahalı egzoz gazı azaltıcı sistemlerin

kullanılmasını engelleyerek zararlı egzoz gazlarının azalmasına yardımcı olmaktadır. Fakat HCCI yanmasının iki önemli problemi bulunmaktadır. Birincisi yüksek motor yüklerinde stabil çalışmama problemidir. İkincisi, yanma zamanlamasının kontrol edilememesidir. İçten yanmalı motorlarda son araştırmalarda ilgi odağı olan diğer bir yanma türü RCCI dir. Reaktif ön karışımli sıkıştırma ile ateşlemeli yanma olan RCCI iki farklı yakıtın enjeksiyonuna bağlı yanma türüdür. Püskürtülen yakıtlardan biri reaktif diğer daha reaktif bir yakıttır. İki yakıtın enjeksiyon zamanlamaları değiştirilerek yanma kontrol edilebilir.

Benajes ve arkadaşları [19] RCCI yanmasında karışım ve kendi kendine tutuşma işlemlerini dizel ve benzin kullanarak deneysel ve sayısal olarak incelemişlerdir. Port enjeksiyonu ve direkt enjeksiyon yapılarak sıkıştırma ile ateşlemeli bir motorda tek boyutlu püskürtme modelini kullanarak analiz gerçekleştirmişlerdir. Dizel yakıtının direkt enjeksiyonu ile benzin, hava ve dizel yakıtının karışımı kendiliğinden tutuşmaya başlayarak yanma devam etmiştir. Daha sonra sıcaklık ve basınç artışı alev cephesinin ilerlemesini sağlayarak yanma odasında fakir dizel ve benzin karışımlarının bulunduğu noktalara doğru ilerlediğini gözlemlemişlerdir. Dizel/benzin oranı azaltırsa tutuşma gecikmesinin arttığını, karışımın oluşturulması için gereken sürenin uzadığını görmüşlerdir. Birinci yanma aşaması sona ererken ikinci aşamada yanmanın iyileşmeye başladığını tespit etmişlerdir. Dizel yakıt enjeksiyonunun avansa alınmasının yanma işlemi üzerinde daha fazla etkiye sahip olduğunu görmüşlerdir. Konvansiyonel dizel yanmasına göre RCCI yanmasında NO_x emisyonlarında bir miktar, duman emisyonlarında ise ciddi bir azalma tespit etmişlerdir. Yaptıkları çalışma sonucunda karışım reaktivitesi tarafından kontrol edilen RCCI yanmasının gerçekleştiğini görmüşlerdir. İlk olarak dizel, benzin ve hava karışımının kendi kendine tutuştuğunu daha sonra yanma odasının genelinde birçok noktadan sıcaklık ve basınç artışının düşük sıcaklık bölgesi boyunca alev gelişiminin gerçekleşmesine neden olduğunu görmüşlerdir. Bunun yanında uygun şartlar sağlanırsa (karışımın reaktivitesi, eşdeğerlik oranı, sıcaklık ve basınç) birkaç noktadan kendi kendine tutuşmanın başlamasıyla alev gelişiminin devam ettiğini görmüşlerdir. Dizel yakıt enjeksiyon zamanlaması avansa alınırsa silindirde daha az düşük lokal reaktiviteli bölge kalmaktadır.

Liu ve arkadaşları [20] n-butanol/biyodizel yakıt karışımlarının yanma ve emisyon karakteristiklerini simülasyona ve deneysel çalışmalara dayanarak incelemişlerdir. N-butanol emme portuna biyodizel ise direkt silindir içerisine püskürtülmüştür. Üç farklı karışım oranlarında yapılan deneylerde (% 80, % 85 ve % 90) biyodizelin enjeksiyon zamanlaması stabil bir yanma sağlamak için karışımın % 50 sinin yanmasını tamamladığı nokta (KA 50) referans alınarak ÜÖN dan 2 ile 10 krank açısı derecesi arasında değiştirilmiştir. EGR % 35 den % 45'e değiştirilmiştir. Biyodizel yakıtının geç ve erken enjeksiyonu ile KA 50 süresini değiştirmediklerini görmüşlerdir. Erken ve geç enjeksiyon için biyodizel reaksiyonu kendi kendine tutuşma ile yanma tetiklenmiştir. Ön karışım oranının artırılması yanma fazının rötara alınmasına neden olmakta, basınç artış oranını azaltmaktadır. Bunun yanında indike termik verimin ön karışım oranının % 90 artırılması ile % 0.6

azaldığını görmüşlerdir. Erken enjeksiyon ile geç enjeksiyona göre NO_x emisyonlarının azaldığını görmüşlerdir. EGR artışı ile NO_x ve is emisyonları azalmış, HC ve CO emisyonları artmıştır.

Li ve arkadaşları [21] çok boyutlu model ile NSGA-II (non-dominated sorting genetic algorithm II) algoritmasını birleştirerek dizel, metanol yakıtları ile çalışan bir motorda RCCI yanmasını optimize etmişlerdir. Optimizasyon çalışmalarına bağlı olan metanolun enerji miktarı, EGR, enjeksiyon başlangıcı, silindir içi basınç ve sıcaklık ile parametrik bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Bu parametrelerin yakıt verimi, tutuşma zamanlaması, emisyonlar üzerindeki etkileri analiz edilmiştir. Deneysel sonuçları ilk sıcaklık ve EGR'nin motor performansı ve emisyonlar üzerinde en büyük etkiye sahip olduklarını göstermiştir. Lokal zengin ve yüksek sıcaklık karışım bölgelerinde metanol miktarı ve enjeksiyon zamanlaması NO_x emisyonlarını önemli oranda azaltmaktadır. Yüksek metanol miktarı ve avansa alınmış enjeksiyon zamanlaması ile gerçekleşen RCCI yanması yakıt veriminin artmasına ve emisyonların azalmasına neden olduğunu görmüşlerdir. Aynı zamanda 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 miktarları belirlenmiştir.

Reitz ve Duraisamy [22] yüksek verimli daha temiz içten yanmalı motorlar üzerinde gelişmeleri incelemişlerdir. Dempsey ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada [23] HCCI, RCCI ve PPC yanma türlerinin silindir basıncı ve ısı dağılımı üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. RCCI yanması HCCI ve PPC yanması ile karşılaştırıldığında daha uzun yanma süresi ve daha düşük basınç artış oranının olduğu görülmektedir. Referans yakıt ile yapılan deneylerde RCCI ile en düşük yanma veriminin elde edildiğini görmüşlerdir. Daha düşük yanma verimine rağmen RCCI yanmasında indike verim daha az ısı kaybından dolayı daha yüksek olduğunu görmüşlerdir.

Can ve arkadaşları [24] tek silindirli HCCI-DI motorunda ön karışimli benzinin yanma ve emisyonlar üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Ön karışimli benzin yakıt oranını % 10, %20 ve % 30 şeklinde değiştirdikleri çalışmada dizel yakıtı ile elde edilen sonuçlarla karşılaştırmışlardır. Deneylerde iki aşamalı yanma görmüşler, birinci aşama yanma safhasında silindir basıncının ve ısı dağılımının arttığını gözlemişlerdir. Bununla birlikte NO_x ve is emisyonları % 16 ve % 65 oranında azaldığını, HC ve CO emisyonlarının arttığını görmüşlerdir.

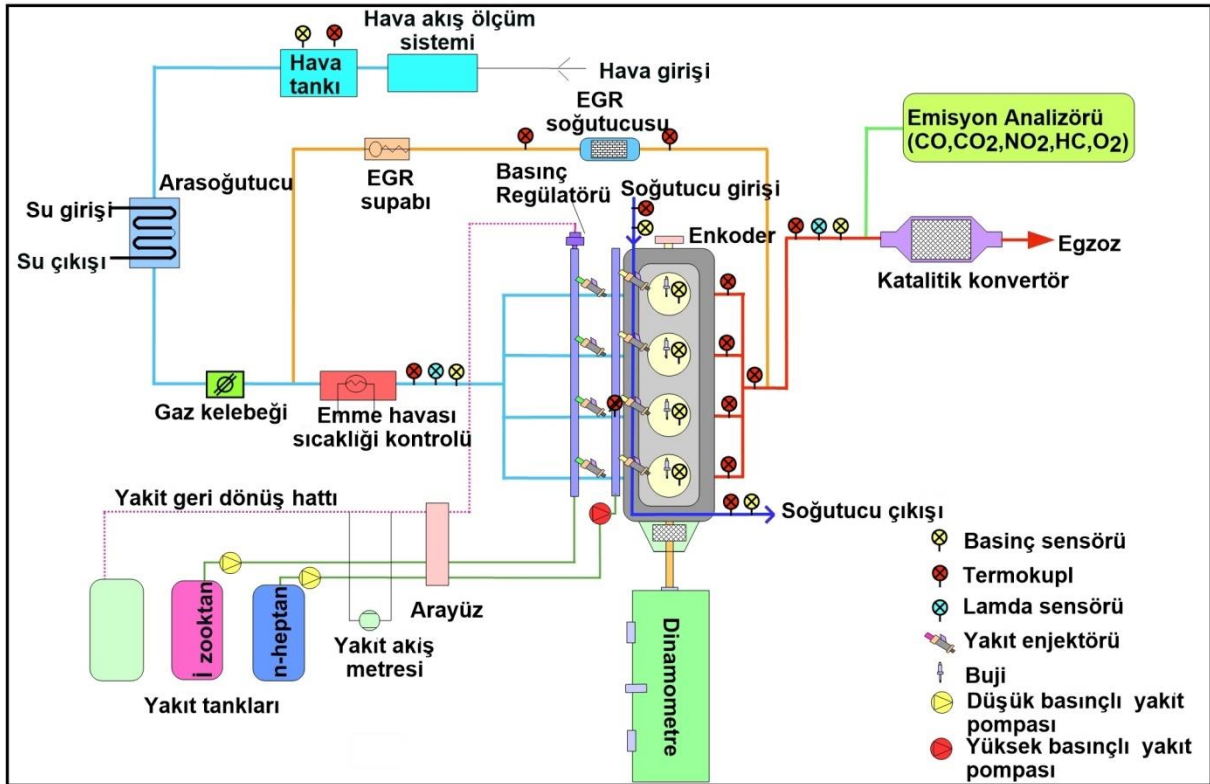
Bu çalışmada dört zamanlı, dört silindirli RCCI bir motor PRF20 yakıtı ile çalıştırılarak enjeksiyon zamanlaması ve lamdanın (ÜÖN'dan 100, 80, 60, 50, 40, 30, 20 °KA önce) yanma ve performans karakteristikleri üzerindeki etkileri deneysel olarak araştırılmıştır. Yakıt enerjisinin % 20'si porttan geriye kalan % 80'i direkt silindir içerisine sevk edilmiştir. Bu amaçla deney motoru 1000 d/d'da, $\lambda=2.2$, $\lambda=1.9$, $\lambda=1.7$ lamda değerlerinde çalıştırılarak silindir basıncı, ısı dağılımı, indike ortalama efektif basınç, çevrimsel farklılıklar, yanma verimi ve maksimum basınç artış oranı gibi yanma karakteristiklerinin değişimi incelenmiştir.

2.MATERYAL VE YÖNTEM

Deneyler Michigan Technological University'de, Advanced Power System Research Center'da gerçekleştirilmiştir. Dört silindirli, dört zamanlı, 2 L hacmindeki GM Ecotec benzinli motor RCCI yanma modunda 1000 d/d motor devrinde çalıştırılmıştır. Deneysel motorun teknik özellikleri Tablo 1'de görülmektedir. Deneysel motoru 460 BG gücünde ayarlanabilir AC dinamometreye bağlanmış, motor yükü ve devri kontrol edilmiştir. Yakıt sistemi için harici yakıt pompası ve elektrikli motor kullanılmıştır. Emme havası giriş sıcaklığı emme manifold ve gaz kelebeği arasına monte edilen hava ısıtıcısı ile kontrol edilebilmektedir. Deneysel düzeneğin şematik görünümü Şekil 1' de görülmektedir.

Tablo 1. Deneysel motorun teknik özellikleri

Model	GM Ecotec LHU Gen I
Silindir çapı x Strok [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



Şekil 1. Deney düzeneğinin şematik görünümü

Yanma analizi için silindir içi basınç PCB piezotronics marka 115A04 model basınç transdüseri ile ölçülmüştür. Ölçülen silindir içi basınç DSP marka 1104CA model şarj amplifikatörü ile yükseltilmiş ACAP yanma analiz sisteminde işlenmiştir. Deney motoruna 1 °KA aralığı hassasiyetinde ölçüm yapabilen enkoder bağlanmıştır. Yakıt tüketimi 1700 model Micro Motion yakıt akış metresi ile ölçülmüştür. Yakıt tüketimi kütleli olarak milligram cinsinden ölçülmüştür. Yakıt geri dönüşü Micro Motion sisteminden önce bulunmakta yakıt geri dönüşü hesaplanmak zorunda kalınmamaktadır. RCCI motor dSPACE MicroAutoBox ve RapidPro üniteleri kullanılarak kontrol edilmiştir. Değişken supap zamanlaması, enjeksiyon zamanlaması, gaz kelebeği konum, EGR gibi parametrelerin kontrolünü içeren motor yönetim sistemi için MATLAB Simulink modeli geliştirilmiş ve kullanılmıştır. dSPACE ünitesi emme ve egzoz kamların fazını, yakıt hat basıncını, gaz kelebeği konumunu, lamdayı, krank açısını ve EGR supabı pozisyonunu ölçebilmektedir. Termokupl, basınç transdüseri ve dinamometre kontrolü için sırasıyla NI TB 4353, NI PXI 6225 and NI PXI 6722 modüllerini içeren National Instrument PXIe 1078 chassis sistemi kullanılmaktadır. Elde edilen verilerin görüntülenmesi için Lab VIEW arayüzü kullanılmıştır.

Silindir içi ham basınç verilerini kullanarak yanma analizini gerçekleştiren MATLAB kodu geliştirilmiştir. Hacimsel verim, fren torku, özgül yakıt tüketimi, indike ortalama efektif basınç (imep), indike termik verim, yanma verimi, basınç artış oranı, ısı dağılımı ve kümülatif ısı dağılımı hesaplanabilmektedir. Bu çalışmada ısı dağılımı termodinamiğin birinci kanunu esas alınarak, ideal gaz kanununa göre hesaplanmıştır. Yanma verimi ise bir çevrim boyunca toplam ısı dağılımının yakıt

tarafından üretilen ısıya oranlanması ile hesaplanmıştır [25-29]. Isı dağılımı ve yanma verimi eşitlik (1) ve (2) ile hesaplanmıştır.

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

Bu eşitlikte dQ , dQ_{heat} , $d\theta$ ve k sırasıyla ısı dağılımı, silindir duvarlarına transfer edilen ısıyı, krank açısı değişimini ve özgül ısıların oranını göstermektedir.

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

Burada t_{bas} ve t_{son} krank açısına bağlı olarak yanma başlangıcını ve sonunu, $\frac{dQ_{gr}}{d\theta}$ krank açısına bağlı olarak toplam ısı dağılımını, Q_{LHV} yakıtın alt ısıl değerini, m_f bir çevrimde silindire sürülen yakıt miktarını ifade etmektedir.

Deneylerde emme portundan izooktan, direkt silindir içerisine n-heptan yakıt püskürtülerek motor RCCI modda çalıştırılmıştır. Bu noktada yakıt enerjisinin % 20'si porttan geriye kalan % 80'i direkt silindir içerisine sevk edilmiştir. Deneylerde kullanılan yakıtların özellikleri Tablo 2' de görülmektedir.

Tablo 2. İzooktan ve n-heptan yakıtlarının özellikleri [30]

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

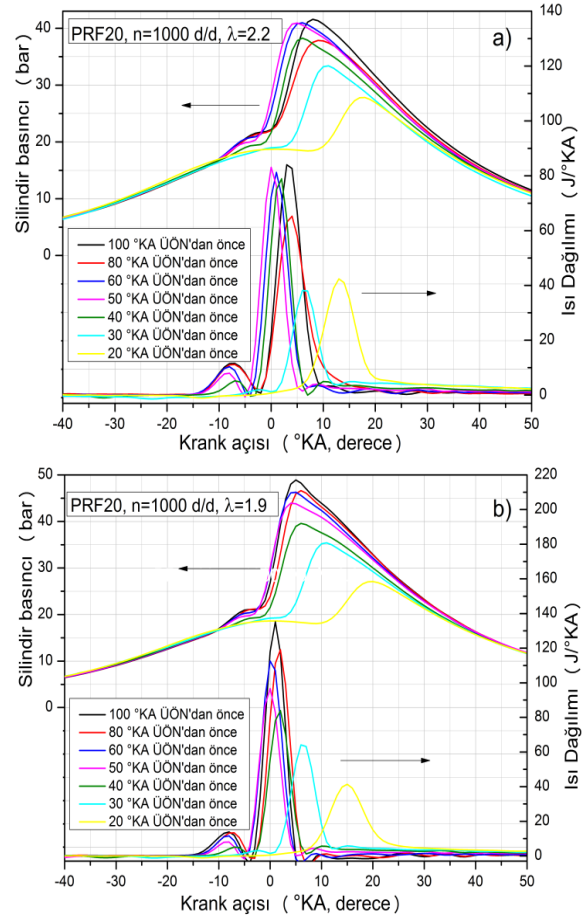
PRF20 yakıtı ile yapılan deneylerde deney şartları ise Tablo 3' de verilmiştir.

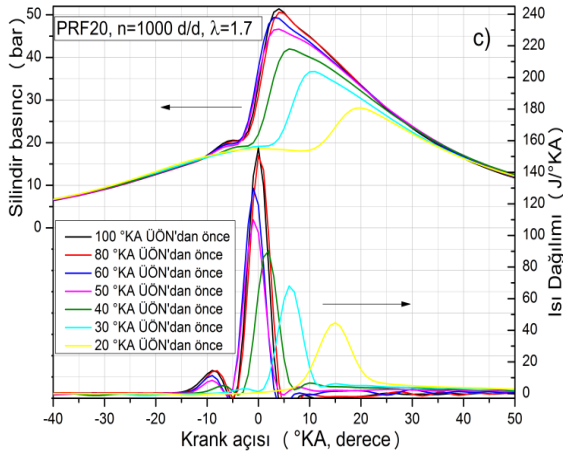
Tablo 3. Deney şartları

Yakıt	PRF20
Porttan enjeksiyon	% 20 izooktan
Direkt enjeksiyon	% 80 n-heptan
Motor yükü	Tam yük
Motor devri [d/d]	1000
Emme havası giriş sıcaklığı [°C]	40
Lamda	2.2, 1.9, 1.7
Egzoz supabı kapanma zamanlaması [ÜÖN'dan önce, °KA]	22
Emme supabı açılma zamanlaması [ÜÖN'dan önce, °KA]	22
Enjeksiyon zamanlaması [ÜÖN'dan önce, °KA]	100, 80,60,50,40,30,20

3. DENEY SONUÇLARI

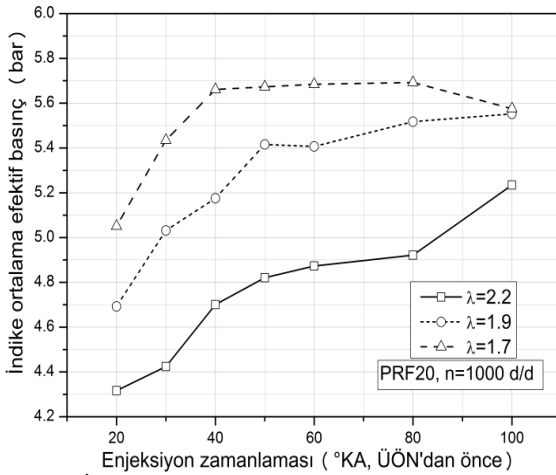
Deneysel sonuçların analizi enjeksiyon zamanlamasının RCCI yanma karakteristikleri üzerindeki etkilerini daha iyi anlamak için gerçekleştirilmiştir. Yakıt özellikleri RCCI yanmasının seyri ve salınan ısı dağılımını oldukça etkilemektedir. Şekil 2'de RCCI yanmasında enjeksiyon zamanlamasının silindir basıncına ve ısı dağılımına etkileri görülmektedir. Enjeksiyon zamanlaması avansa alındıkça her bir lamda değeri için maksimum silindir basıncının arttığını ve avansa alındığını söylemek mümkündür. Benzer şekilde ortaya çıkan ısı miktarında da artış görülmüştür. Enjeksiyon zamanlamasının avansa alınması ile daha homojen bir karışım konsantrasyonunun elde edilebilmesi için yanma odasında yeterli zamanın olduğu görülmektedir. Isı dağılımı eğrileri incelendiğinden iki aşamalı ısı dağılımının olduğu görülmektedir. Bununla birlikte lamda azaldıkça elde edilen maksimum silindir basıncının ve ısı dağılımının arttığı görülmektedir. Yanma odasındaki daha yüksek yakıt konsantrasyonu açığa çıkan ısı miktarının artışına neden olmakta karışım zenginleştikçe silindir basıncının ve ısı dağılımının arttığı görülmüştür. Geç enjeksiyon ile homojen karışım elde edilememekte, yanma kalitesi ve net iş azalmaktadır. Bu doğrultuda enjeksiyon zamanlaması RCCI yanmasının seyri olarak değiştirmektedir.





Şekil 2. RCCI yanmasında enjeksiyon zamanlamasının silindirik basıncına ve ısı dağılımına etkileri

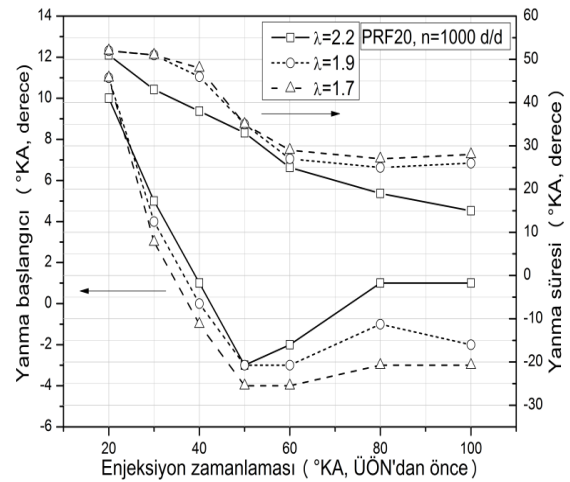
Motor performans parametresi göstergelerinden biri olan indike ortalama efektif basınç (imep) bir çevrim boyunca piston üzerine uygulanan basınçların ortalamasını göstermektedir. İndike ortalama efektif basınç enjeksiyon zamanlamasına göre değişimi Şekil 3’de görülmektedir. 1000 d/d’da RCCI yanma modunda yapılan deneylerde enjeksiyon zamanlaması avansa alındıkça imep değerlerinin arttığı görülmektedir. Enjeksiyon zamanlaması avansa alındıkça karışım konsantrasyonunun reaktivitesi iyileşmekte, daha yüksek imep değerleri elde edilmektedir. Maksimum imep ÜÖN’den önce 80 °KA enjeksiyon zamanlamasında $\lambda=1.7$ lamda değerinde 5.69 bar olarak belirlenmiştir. Aynı enjeksiyon zamanlamasında $\lambda=1.9$ ve $\lambda=2.2$ değerlerinde sırasıyla 5.51 bar ve 4.92 bar imep elde edilmiştir. Şekil 3’de görüldüğü gibi karışım zenginleştikçe silindirik içine sürülen yakıt enerjisinin artışına bağlı olarak imep artmıştır.



Şekil 3. İndike ortalama efektif basınç değişimi

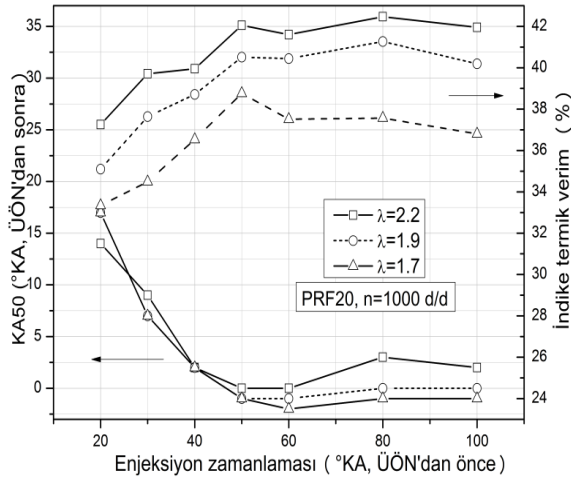
Yanma analizinde en önemli parametrelerden bazıları yanma başlangıcı ve yanmanın süresidir. Krank açısına göre yanma başlangıcı yanmanın seyrini önemli derecede etkilemektedir. Şekil 4 RCCI yanmasında enjeksiyon zamanlaması ve lamdanın yanma başlangıcı ve yanma süresine etkilerini göstermektedir. Yanma başlangıcı 50 °KA enjeksiyon zamanlamasına kadar avansa alınmaktadır. Ancak enjeksiyon zamanlaması daha fazla erkene alındığında tüm lamda değerleri için yanmanın

rötara alındığı görülmüştür. Püskürtmenin çok fazla avansa alınması durumunda silindir içi sıcaklık ve basınç düşüktür. Püskürtmenin yapıldığı anda yanma odasındaki düşük sıcaklık ve basınçtan dolayı tutuşmanın oluşması için gerekli termodinamik şartlar elde edilememekte ve yanma daha geç başlamaktadır. Karışımın zenginleşmesi sonucu yanma odasında daha yüksek konsantrasyonda bulunan yakıt molekülleri ile oksijen molekülleri daha önce buluşarak yanmanın avansa alınmasını sağlamışlardır. Enjeksiyon zamanlaması avansa alındıkça yanma süresi tüm lamda değerleri için azalmaktadır. Homojen karışımın daha önce yanma odasında elde edilmesi yanmanın daha kısa sürede gerçekleşmesine neden olmaktadır. Benzer şekilde karışım zenginleştikçe yanma süresi kısalmaktadır.



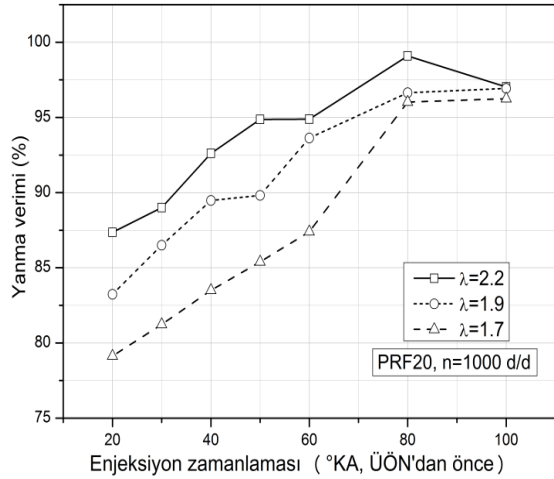
Şekil 4. RCCI yanmasında enjeksiyon zamanlaması ve lamdanın yanma başlangıcı ve yanma süresine etkileri

Şekil 5’de enjeksiyon zamanlaması ve lamdanın KA50 ve indike termik verim üzerindeki etkileri görülmektedir. KA50 ile termik verim arasında yakın bir ilişki bulunmaktadır. Daha yüksek termik verim için KA50 değeri ÜÖN ‘dan hemen sonra elde edilmelidir [25-33]. Yanma başlangıcına benzer olarak KA50 değeri enjeksiyon zamanlaması avansa alındıkça azalmıştır. ÜÖN’den önce 60 °KA enjeksiyon zamanlamasına kadar KA50 değeri azalmış bu değerden sonra bir miktar artış göstermiştir. KA50 değerinin ÜÖN’den sonra geç elde edilmesi sonucu indike termik verimin azaldığı görülmektedir. Şekil 5’de görüldüğü gibi 60, 80, ve 100 °KA enjeksiyon zamanlaması değerlerinde KA50 ÜÖN’den hemen sonra elde edilmiş ve indike termik verim artış göstermiştir. Bu noktada KA50 ile indike termik verim arasında güçlü bir uyumun olduğu görülmüştür. Maksimum indike termik verim 80 °KA enjeksiyon zamanlaması ve $\lambda=2.2$ lamda değerinde % 42.47 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 5. Enjeksiyon zamanlaması ve lamdanın KA50 ve indike termik üzerindeki etkileri

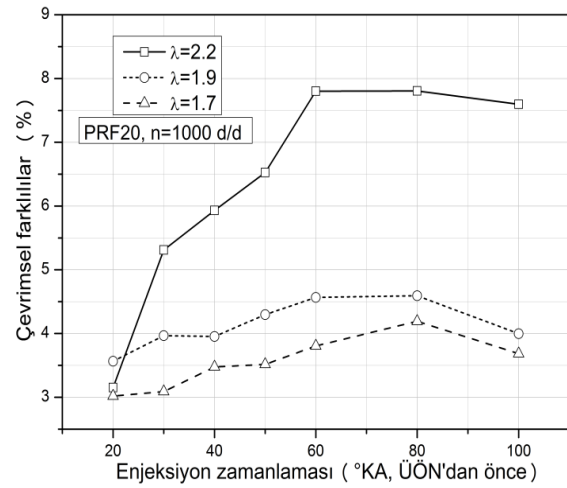
ÜÖN'dan önce 60, 80, 100 °KA enjeksiyon zamanlaması değerlerinde $\lambda=1.9$ ve $\lambda=1.7$ ile yapılan deneylerde KA50 değerinin ÜÖN'dan önce elde edildiği görülmektedir. Bununla birlikte karışım zenginleştikçe indike termik verimin azaldığı görülmektedir. 80 °KA enjeksiyon zamanlamasında $\lambda=1.9$ ve $\lambda=1.7$ lamda değerlerinde sırasıyla % 41.27 ve % 37.57 indike termik verim hesaplanmıştır. Şekil 6 RCCI yanmasında yanma veriminin değişimini göstermektedir. Enjeksiyon zamanlaması avansa alındıkça yanmanın kalitesi iyileşmekte ve yanma verimi artmaktadır. Erken enjeksiyon ile karışımın reaktivitesi ve homojenliği iyileşmekte, yanma verimi artmaktadır. Yanma sonu ürünleri yanma veriminin artışına bağlı olarak lamda arttıkça azalmaktadır [25-27]. Şekil 6'da görüldüğü gibi lamda arttıkça yanma verimi artmaktadır.



Şekil 6. RCCI yanmasında yanma veriminin değişimi

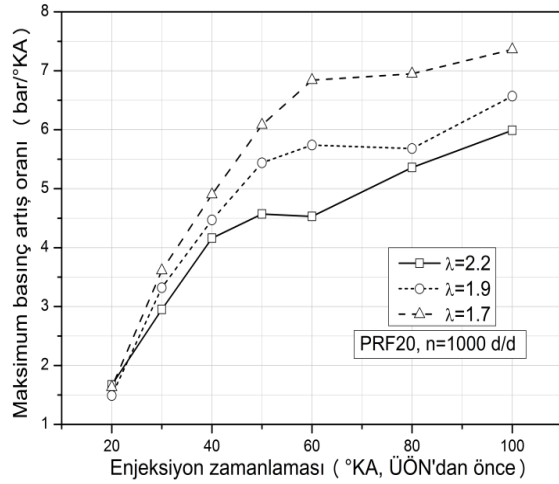
Silindire alınan karışımın kompozisyonu, çevrimin başlangıcındaki basınç ve sıcaklık ve karışımın termodinamik özellikleri çevrimden çevrime farklılıkların oluşmasına neden olmaktadır. Meydana gelen çevrimsel farklılıklar motorun kararsız çalışmasına neden olmaktadır. Stabil yanmanın gerçekleşebilmesi için çevrimsel farklılıkların % 10'u geçmesi istenmeyen bir durumdur [25-27]. Şekil 7 enjeksiyon zamanlaması ve lamda değerlerinin imep değerlerine bağlı çevrimsel farklılıklar üzerindeki etkilerini göstermektedir. Şekil

7'de görüldüğü gibi tüm enjeksiyon zamanlaması ve lamda değerlerinde çevrimsel farklılıklar % 10 değerini aşmamıştır. 80 °KA enjeksiyon zamanlaması değerine kadar tüm lamda değerlerinde çevrimsel farklılıkların arttığı görülmektedir. 100 °KA enjeksiyon zamanlamasında çevrimsel farklılıkların bir miktar azaldığı görülmüştür. RCCI uygulamasında PRF20 kullanılması durumunda toplam enerjinin % 80'i kısmi direkt enjeksiyon ile silindir içerisine verilmektedir. N-heptanın buharlaşma yeteneği benzine göre daha düşüktür. Püskürtme avansı arttıkça yakıtın buharlaşabilmesi için daha çok zaman kalmaktadır. Bu durumda silindir duvarından kaybolan ısı miktarı azalarak yakıtın buharlaşması için harcanmaktadır ve daha homojen bir karışım elde edilebilmektedir. Ancak düşen silindir içi sıcaklık nedeniyle yanma başlangıcı değişmekte ve bunun sonucunda çevrimsel farklılıkların 80 °KA enjeksiyon zamanlamasına kadar arttığı daha sonra azaldığı düşünülmektedir. Aynı zamanda 100 °KA enjeksiyon zamanlamasında yakıtın daha homojen bir karışım oluşturarak çevrimsel farklılıkları azalttığı düşünülmektedir.



Şekil 7. Çevrimsel farklılıkların değişimi

Şekil 8'de RCCI yanmasında enjeksiyon zamanlaması ve lamdanın maksimum basınç artış oranına etkileri görülmektedir. Enjeksiyon zamanlaması avansa alındıkça maksimum basınç artış oranı artmaktadır. Daha önce hazırlanan karışım kompozisyonu ve homojen karışım ile yanma kalitesi artmakta basınç artış oranı artış göstermektedir. 100 °KA enjeksiyon zamanlamasında, $\lambda=2.2$, $\lambda=1.9$ ve $\lambda=1.7$ lamda değerlerinde sırasıyla 5.99 bar/°KA, 6.57 bar/°KA ve 7.36 bar/°KA maksimum basınç artış oranları belirlenmiştir. Bununla birlikte karışım zenginleştikçe silindire sürülen yakıt enerjisinin artışına bağlı olarak maksimum basınç artış oranı artmıştır.



Şekil 8. RCCI yanmasında enjeksiyon zamanlaması ve lamdanın maksimum basınç artış oranına etkileri

4. SONUÇ

Bu çalışmanın amacı enjeksiyon zamanlaması ve lamdanın RCCI yanma ve motor performans karakteristiklerine etkilerinin deneysel olarak incelenmesidir. Enjeksiyon zamanlaması avansa alındıkça maksimum silindir basıncının arttığı ve RCCI yanmasının avansa alındığı görülmüştür. Bununla birlikte ısı dağılımı enjeksiyon zamanlamasının avansa alınmasıyla artmıştır. Karışımın fakirleşmesi sonucu elde edilen maksimum silindir basıncı ve ısı dağılımı değerlerinin azaldığı görülmüştür. Deney sonuçları enjeksiyon zamanlaması erkene alındığında indike termik verimin arttığını göstermiştir. Maksimum indike termik verim 80 °KA enjeksiyon zamanlaması ve $\lambda=2.2$ lamda değerinde % 42.47 olarak hesaplanmıştır. Karışım zenginleştikçe indike termik verimin azaldığı belirlenmiştir. İndike termik verime benzer şekilde yanma verimi enjeksiyon zamanlaması avansa alındıkça artmıştır. Sonuçta enjeksiyon zamanlaması ve lamdanın RCCI yanması üzerinde büyük bir etkiye sahip olduğu, yanma fazının kontrol edilebileceği görülmüştür.

SEMBOLLER

AC	Alternatif akım
BG	Beygir güç
BTDC	Üst ölü noktadan önce
CO	Karbon monoksit
CH ₄	Metan
DME	Di-metil eter
HC	Hidrokarbon
HCCI	Homogen dolgulu sıkıştırma ile ateşlemeli
imep	İndike ortalama efektif basınç
k	Özgül ısıların oranı
KA	Krank açısı
m_f	Bir çevrimde silindire sürülen yakıt miktarı
n	Motor devri
NO _x	Azot oksit
PCCI	Ön karışım dolgulu sıkıştırma ile ateşlemeli
PPC	Kısmi ön karışımli yanma
PRF	Birincil referans yakıt

RCCI	Reaktif kontrollü sıkıştırma ile ateşlemeli
dQ	Isı dağılımı
dQ _{heat}	Silindir cidarlarına transfer edilen ısı
dQ _{gr}	Toplam ısı dağılımı
Q _{LHV}	Yakıtın alt ısıl değeri
P	Silindir basıncı
V	Silindir hacmi
θ	Krank mili açısı
λ	Lamda
η_{yanma}	Yanma verimi
$t_{y_{baş}}$	Krank açısına bağlı olarak yanma başlangıcı
$t_{y_{son}}$	Krank açısına bağlı olarak yanma sonu
ÜÖN	Üst ölü nokta

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın yapılabilmesi için Hamit SOLMAZ 2219/A Doktora sonrası araştırma bursu kapsamında TÜBİTAK tarafından desteklenmiştir. Ayrıca deney düzenineğin 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

- [1] Uyumaz, A., "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, (2015).
- [2] Çınar, C., Uyumaz, A., Polat, S., Yılmaz, E., Can, Ö., Solmaz, H., "Combustion and performance characteristics of an HCCI engine utilizing trapped residual gas via reduced valve lift", *Applied Thermal Engineering*, 100: 586–594, (2016).
- [3] Cinar, C., Uyumaz, A., Solmaz, H., Sahin, F., Polat, S., Yılmaz, 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*, 130:275–81, (2015).
- [4] Cinar, C., Uyumaz, A., Solmaz, H., Topgül, T., "Effects of valve lift on the combustion and emissions of a HCCI gasoline engine" *Energy Conversion and Management* 94: 159–168, (2015).

- [5] Zhang, Y., He, BQ., Xie, H., Zhao, H., "The combustion and emission characteristics of ethanol on a port fuel injection HCCI engine", SAE International Technical Papers, 2006-01-0631.
- [6] He, B-Q., Yuan, J., Liu M-B, Zhao H., "Combustion and emission characteristics of a n-butanol HCCI engine", *Fuel*, 115:758–64, (2014).
- [7] Godino, JAV, Garcia, MT, Aguilar, FJJ-E, Trujillo EC., "Numerical study of HCCI combustion fueled with diesel oil using a multizone model approach", *Energy Conversion and Management*, 89:885–95, (2015).
- [8] Yang, C, Zhao, H. "Naturally aspirated and boosted controlled auto-ignition combustion with positive valve overlap in a four-stroke gasoline engine", *Int J Engine Res*, 14:496-511, (2013).
- [9] Kim, MY, Lee, JH, Lee, CS., "Combustion characteristics and NOx emissions of a dimethyl-ether-fueled premixed charge compression ignition engine", *Energy Fuels* 22:4206-12 ,(2008).
- [10] Liu, HF., Xu, J., Zheng, ZQ, Li, SJ, Yao, MF., "Effects of fuel properties on combustion and emissions under both conventional and low temperature combustion mode fueling 2,5-dimethylfuran/diesel blends", *Energy*, 62:215-23, (2013).
- [11] Kokjohn, SL, Hanson, RM, Splitter, DA, RD., "Experiments and modeling of dual-fuel HCCI and PCCI combustion using in-cylinder fuel blending", SAE; 2009. paper 2009-01-2647.
- [12] Kokjohn, S.L., Hanson, R.M., Splitter, D.A., Reitz, R.D., "Experiments and modeling of dual-fuel HCCI and PCCI combustion using in-cylinder fuel blending", SAE Int. J. Engines (2009), 2009-01-2647.
- [13] Hanson, R.M., Kokjohn, S. L., Splitter, D.A., Reitz, R.D., "An experimental investigation of fuel reactivity controlled PCCI combustion in a heavy-duty engine", SAE Int. J. Engines (2010), 2010-01-0864.
- [14] Papagiannakis, R.G., Hountalas, D.T., "Experimental investigation concerning the effect of natural gas percentage on performance and emissions of a DI dual fuel diesel engine", *Appl. Therm. Eng.* 23 (3) (February 2003) 353-365.
- [15] Ansari, E., Poorghasemi, K., Khoshbakht Irdmousa, B., Shahbakhti, M. et al., "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, 2016, doi:10.4271/2016-01-2309.
- [16] Çelik, M., Combustion, performance and exhaust emission characteristics of organic based manganese addition to cotton methyl ester, *Applied Thermal Engineering*, 108, 1178-1189, 2016.
- [17] Liu, J., Yang, F., Wang, H., Ouyang, M., "Numerical study of hydrogen Addition to DME/CH₄ dual fuel RCCI engine", *International Journal of Energy*, 37, 8688-8697, (2012).
- [18] Saxena, S., Bedoya, I.D., "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, (2013).
- [19] Benajes, J., Molina, S., García, A., Belarte, E., Vanvolsem, M., "An investigation on RCCI combustion in a heavy duty diesel engine using in-cylinder blending of diesel and gasoline fuels", *Applied Thermal Engineering*, 63, 66-76, (2014).
- [20] Liu, H., Wang, X., Zheng, Z., Gu, J., Wang, H., Yao, M., "Experimental and simulation investigation of the combustion characteristics and emissions using n-utanol/biodiesel dual-fuel injection on a diesel engine", *Energy*, in-press,(2014) 1-12.
- [21] Li, Y., Jia, M., Chang, Y., Liu, Y., Xie, M., Wang, T., Zhou, L., "Parametric study and optimization of a RCCI (reactivity controlled compression ignition) engine fueled with methanol and diesel", *Energy* 65, 319-332, (2014).
- [22] Reitz, R.D., Duraisamy, G., "Review of high efficiency and clean reactivity controlled compression ignition (RCCI) combustion in internal combustion engines", *Progress in Energy and Combustion Science*, in-press, (2014) 1-60.
- [23] Dempsey, A., Walker, N., Gingrich, E., Reitz, RD., "Comparison of low temperature combustion strategies for advanced compression ignition engines with a focus on controllability", *Combust Sci Technol*, 86(2):210-41, (2014).
- [24] Can O., Cinar C., Sahin F., "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, (2009).
- [25] Zhao, H., HCCI and CAI engines for the automotive industry. Cambridge England: Woodhead Publishing Ltd; (2007).
- [26] Heywood, J. B., "Internal combustion engine fundamentals", New York: McGraw- Hill; (1988).
- [27] Stone, R., Introduction to Internal Combustion Engines, 1999; Macmillan Press Ltd, ISBN 0-333-74013- 0, Tesseroux, I.; Toxicoll, Lett., 2004, 149, 295-300.

- [28] Polat, S., Kannan, K., Shahbakhli, M., Uyumaz, A., Yücesu, H.S., An Experimental Study for the Effects of Supercharging On Performance and Combustion of an Early Direct Injection HCCI Engine, Second International research conference on Engineering, science and management, Dubai, 2015.
- [29] Çınar, C., Uymaz, A., Polat, S., Solmaz, H., Yılmaz, E., Influence of Residual Gas Fraction on Performance and Combustion Characteristics in HCCI Engine with Reduced Valve Lift, Second International research conference on Engineering, science and management, Dubai, 2015.
- [30] Anonymous, 2,2,4-2-2-4Trimethylpentane-compound summary, PubChem Compound. USA: National Center for Biotechnology Information 26 March Identification and Related Records, 2005 (Retrieved March 2012).
- [31] Tsurushima, T., ‘‘A new skeletal PRF kinetic model for HCCI combustion’’, *Proceedings of the Combustion Institute*, 32: 2835-2841, (2009).
- [32] Amano, T., Morimoto, S., Kawabata, Y., ‘‘Modeling of the Effect of Air/Fuel Ratio and Temperature Distribution on HCCI Engines’’, SAE Technical Paper 2001-01-1024, 2001.
- [33] Sjöberg, M., Edling, L., Eliassen, T., Magnusson, L., Angström, H., ‘‘GDI HCCI: Effects of Injection Timing and Air Swirl on Fuel Stratification, Combustion and Emissions Formation’’, SAE Technical Paper 2002-01-0106, 2002.