



Effects of Air Excess Ratio on Combustion and Engine Performance in a Homogeneous Charge Compression Ignition Engine fuelled with Hexane and N-Heptane Fuel Mixtures

Emre YILMAZ 

Sakarya University of Applied Sciences, Department of Motor Vehicles and Transportation Technologies, 54300, Arifiye/SAKARYA

Article Info:

Research article

Received: 31/10/2019

Revision 09/12/2019

Accepted: 21/12/2019

Highlights

- Air Excess Ratio.
- Homogeneous Charge Compression Ignition.
- Emissions.

Keywords

Air Fuel Ratio
Homogeneous Charge
Compression Ignition
Engine Performance

Graphical/Tabular Abstract

Homogeneous charge compression ignition engines are engines with low temperature combustion tendency and high thermal efficiency. HCCI combustion is highly affected by engine operating parameters. In this study, a single-cylinder four-stroke spark-ignition engine was converted to a homogeneous charge compression ignition engine. The test engine was operated with hexane and n-heptane fuel mixtures at 1400 rpm and between 1.9 and 2.74 air excess ratio in full load HCCI combustion mode.

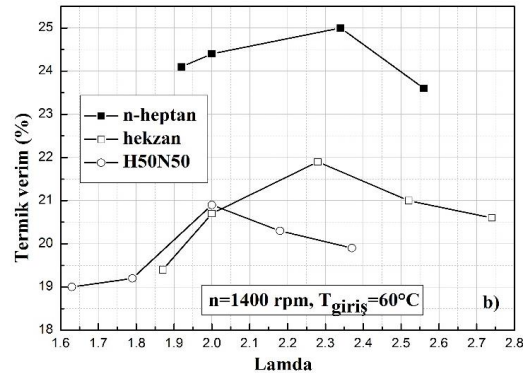


Figure A. Thermal efficiency of the engine for n-heptane and hexane

Purpose: The aim of the study is to investigate the effects of air excess ratio on combustion and engine performance in a homogeneous charge compression ignition (HCCI) engine powered with hexane and n-heptane fuel mixtures.

Theory and Methods: Experimental study was performed on an HCCI engine that was converted from spark ignition (SI) engine. Three pure n-heptane, pur hexane and a fuel blend containing 50% n-neptane and 50% hexane by volume were used as test fuels. Experiments were carried out at constant intake air temperature of 60 °C, engine speed of 1400 rpm for different lambda values. The raw in-cylinder pressure data was processed by a MATLAB code.

Results: The results have shown that hexane provided more leaner combustion compared to n-heptane. The maximum air excess value was 2.56 for n-heptane while it was 2.74 for hexane fuel. On the other hand hexane caused a delay on start on combustion due to its higher octane rating. As a result of this combustion phase also retarded. Maximum thermal efficiency was observed with n-heptane as about 25 %.

Conclusion: An experimental was carried out to investigate the effects of n-heptane and hexane fuels on combustion, performance and emission characteristics of a homogeneous charged compression ignition engine. High octane rating of the hexane was enhanced the control of the combustion in HCCI engine. In addition to this, hexane provided more leaner combustion than n-heptane. However, high octane rating of the hexane caused a delay on combustion phase and start of the combustion. As a result of this, thermal efficiency of the HCCI engine dropped compared to n-heptane combustion.

GU J Sci, Part C, 8(1): 26-39 (2020)

Gazi Üniversitesi

Fen Bilimleri Dergisi

PART C: TASARIM VE TEKNOLOJİ

<http://dergipark.gov.tr/gujsc>

Hekzan ve N-Heptan Yakıt Karışımları ile Çalışan Homojen Dolgulu Sıkıştırma İle Ateşlemeli (HCCI) Bir Motorda Hava Fazlalık Katsayısının Yanma ve Motor Performansı Üzerindeki Etkileri

Emre YILMAZ

Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Motorlu Taşıtlar ve Ulaştırma Teknolojileri Bölümü, 54300, Arifiye/SAKARYA

Öz

Homojen dolgulu sıkıştırma ile ateşlemeli motorlar düşük sıcaklık yanma eğilimine ve yüksek termik verime sahip motorlardır. Yanma üzerinde doğrudan kontrolün olmadığı bu motorların çalışma aralığı vuruntu ve tutuşmama problemleri nedeniyle sınırlandırılmaktadır. Bu noktada silindire alınan karışım kompozisyonu ve farklı çalışma parametreleri ile özellikle yüksek yüklerde vuruntu probleminin ortadan kaldırılması amaçlanmaktadır.

HCCI yanması motor çalışma parametrelerinden oldukça etkilenmektedir. Bu çalışmada tek silindirli dört zamanlı, buji ile ateşlemeli bir motor homojen dolgulu sıkıştırma ile ateşlemeli motora dönüştürülmüştür. Deney motoru hekzan ve n-heptan yakıt karışımları ile 1400 d/d'da, 1.9 ile 2.74 hava fazlalık katsayısı (HFK) değerleri arasında, tam yükte HCCI yanma modunda çalıştırılmıştır. Hekzan yakıtının silindir basıncı, ısı dağılımı, silindir içi sıcaklık, yanma süresi, yanma başlangıcı, çevrimsel farklılıklar, vuruntu yoğunluğu, indike ortalama efektif basınç (imep), termik verim ve emisyonlar (HC ve CO) üzerindeki etkileri deneysel olarak incelenmiştir. Sabit emme havası giriş sıcaklığında yapılan deneylerde hava fazlalığı arttıkça silindir basıncının genişletilebileceği görülmüştür.

Makale Bilgisi

*Araştırma makalesi**Başvuru: 31/10/2019**Düzeltilme: 09/12/2019**Kabul: 21/12/2019*

Anahtar Kelimeler

*Hava Yakıt Oranı**Homojen Dolgulu**Sıkıştırma ile Ateşlemeli**Motor Performansı*

Keywords

*Air Fuel Ratio**Homogeneous Charge**Compression Ignition**Engine Performance*

Effects of Air Excess Ratio on Combustion and Engine Performance in a Homogeneous Charge Compression Ignition Engine fuelled with Hexane and N-Heptane Fuel Mixtures

Abstract

Homogeneous charge compression ignition engines are engines with low temperature combustion tendency and high thermal efficiency. The operating range of these engines, where there is no direct control over combustion, is limited because of knock and misfire problems. At this point, it is aimed to eliminate the knocking problem especially at high loads with the mixture composition taken into the cylinder and different operating parameters.

HCCI combustion is highly affected by engine operating parameters. In this study, a single-cylinder four-stroke spark-ignition engine was converted to a homogeneous charge compression ignition engine. The test engine was operated with hexane and n-heptane fuel mixtures at 1400 rpm and between 1.9 and 2.74 air excess ratio in full load HCCI combustion mode. The effects of hexane fuel on cylinder pressure, heat release rate, in-cylinder temperature, combustion duration, start of combustion, cyclic variations, knock density, indicated mean effective pressure (imep), thermal efficiency and emissions (HC and CO) were investigated experimentally. In the experiments carried out at constant intake air inlet temperature, it was observed that the cylinder pressure and heat release rate decreased with increasing air excess ratio. As a result, HCCI combustion was found to be highly affected by air excess ratio and fuel composition. It has also been found that the range of operation can be extended in the knock boundary zone in HCCI combustion.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

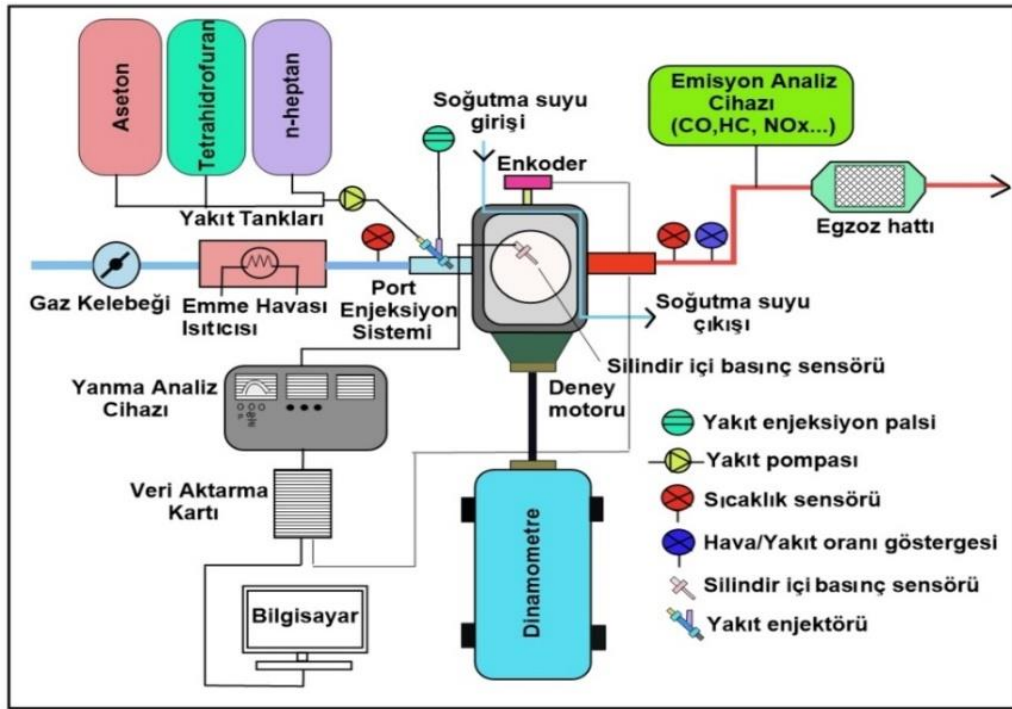
İçten yanmalı motorlar üzerinde çalışılan en önemli konulardan biri düşük sıcaklık yanmasıdır. Konvansiyonel çevrimlerde yanma sonu gaz sıcaklığı yükselerek NO_x emisyonlarının oluşumu gözlemlenmektedir. Aynı zamanda motorların termik verimleri çok fazla arttırılamamaktadır. Sıkıştırma

ile ateşlemeli motorlarda özellikle zengin karışımlara doğru NO_x ve is emisyonları artış göstermekte, birlikte azaltılamamaktadır. Buji ile ateşlemeli motorlar stokiometrik karışım oranlarına yakın hava-yakıt oranlarında çalıştırılmakta termik verimleri düşük sıkıştırma oranlarından dolayı sıkıştırma ile ateşlemeli motorlara göre azalmaktadır [1-3]. Katalitik konvertör, dizel partikül filtresi gibi egzoz gazlarını indirgeme ve azaltma sistemleri maliyetli ve uygulama açısından sınırlamalar getirdiğinden araştırmacılar düşük sıcaklık yanma modları üzerinde yoğunlaşmaktadırlar. Bu noktada homojen fakir karışımın kendiliğinden tutuşturulması ile meydana gelen homojen dolgulu sıkıştırma ile ateşlemeli yanma (HCCI) büyük ilgi çekmektedir. HCCI yanması fakir homojen karışımın yanma odasının tamamında eş zamanlı tutuşarak kendiliğinden yanması ilkesine dayanmaktadır. Fakir karışımın yanması sonucu yanma sonu gaz sıcaklığı azalmakta, dizel motorlardan kaynaklanan is ve NO_x emisyonları eş zamanlı azaltılabilmektedir [2-8]. Yanma odasının genelinde fakir karışımın tamamının oksidasyon reaksiyonlarına iştirak ettirilmesi ile termik verim arttırılabilmektedir. Homojen dolgunun kendiliğinden yanması esnasında ısı dağılımı iki kademedele ele alınmaktadır. Bunlar düşük sıcaklık ısı dağılımı ve yüksek sıcaklık ısı dağılımıdır. Bunun yanında kendiliğinden yanma safhasında yanma üzerinde bir kontrol bulunmamaktadır [3-9]. Dolayısı ile kendiliğinden yanma sıkıştırma sonundaki karışımın kompozisyonu ve yanma odası sıcaklığı gibi parametrelerden doğrudan etkilenmektedir. Aşırı fakir karışımlarda ve düşük motor yüklerinde ateşlenememe problemi görülebilmektedir. Benzer şekilde özellikle zengin karışımlarda ve yüksek motor yüklerinde vuruntu görülmektedir. Karışımın aniden ve hızlı bir şekilde yanmasında bağlı olarak basınç artış oranı artmakta ve istenmeyen vuruntu görülmektedir. HCCI yanmasında kontrol edilmesi gereken en önemli noktalardan biri hızlı ısı dağılımına bağlı olarak meydana gelen bu vuruntudur. HCCI motorun geniş yük ve devir aralığında çalışmasını da olumsuz yönde etkilemektedir. Bu durumun kontrol edilmesi için, egzoz gazı geri dönüşümü (EGR), değişken supap mekanizması, süperşarj, değişken sıkıştırma oranı ve farklı alternatif yakıtların kullanılması gibi bir çok uygulama yapılmaktadır. HCCI yanmasını direkt olarak etkileyen değişkenlerden biri farklı kimyasal özelliklerdeki yakıtlardır. Özellikle oktan sayısı yüksek kendiliğinden tutuşma temayülü düşük yakıtlar ile hızlı ısı dağılımı önenebilmekte, HCCI yanması kontrol edilebilmektedir. Bu doğrultuda, oktan sayısı referans yakıtlara göre nispeten yüksek yakıtlar kullanılabilmektedir [4-16]. Uyumaz [17] n-bütanol ve izopropanol yakıtlarının farklı emme giriş sıcaklıklarında HCCI yanması üzerindeki etkilerini incelemiştir. 1500 d/d ve $\lambda=2'$ de yapılan deneylerde izopropanolün n-bütanole göre vuruntuya daha fazla direnç gösterdiğini belirtmiştir. Termik verim açısından n-bütanolün izopropanale göre daha avantajlı olduğunu göstermiştir. Çınar ve arkadaşları [18] %20 n-heptan ve %80 izooktan yakıt karışımı ile (RON80) çalışan HCCI bir motorda emme havası giriş sıcaklığının HCCI yanması ve performans üzerindeki etkilerini araştırmıştır. Emme havası giriş sıcaklığı arttıkça yanmanın avansa alındığını, yanma süresinin azaldığını ifade etmişlerdir. Çınar ve arkadaşları bir başka çalışmada [19] farklı değişken kam mekanizmaların HCCI yanması üzerindeki etkilerini araştırmıştır. Kullanılan dört farklı kam mekanizması ile kararlı HCCI yanması 800-1900 d/d, $\lambda=0.5-2$ değerleri arasında sağlanmıştır. Düşük supap kalkma miktarına sahip kam mekanizmaları ile HCCI çalışma aralığının genişletilebileceği görülmüştür. Çınar ve arkadaşları [21] art gaz miktarının HCCI yanması üzerindeki etkilerinin deneysel olarak araştırmışlardır. 1200 d/d'da emme 5.5-egzoz 3.5 mm kam mekanizması ile indike termik verim emme 3.5-egzoz 3.5 mm kam mekanizmasına göre %17.91 arttığını görmüşlerdir. Uyumaz ve arkadaşları [21] reaktif kontrollü sıkıştırma ile ateşlemeli bir motorda (RCCI) lamdanın yanma üzerindeki etkilerini incelemiştir. RCCI yanması yanma odasına gönderilen yakıtın % 40'ı porttan izooktan, %60'ı direkt silindire n-heptan püskürtülerek gerçekleştirilmiştir. Lamda arttıkça termik verim artmış, özgül yakıt tüketimim azalmıştır. Aynı zamanda karışım fakirleştikçe çevrimsel farklılıkların arttığını görmüşlerdir. Polat ve arkadaşları [22] n-heptan yakıtı ile çalışan HCCI bir motorda enjeksiyon zamanlamasının HCCI yanması üzerindeki etkilerini incelemiştir. Enjeksiyon avansa alındığında maksimum silindir basıncı artmış ve yanma avansa alınmıştır. Aynı zamanda yakıt üst ölü noktaya (ÜÖN) yakın püskürtüldüğünde tek kademe HCCI yanmasının olduğunu görmüşlerdir. Uyumaz ve Solmaz [23] emme havası giriş sıcaklığı ve ön karışım yakıt oranının RCCI yanması üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Benzinli motor 1000 d/d'da 40°C, 60°C ve 80°C emme havası giriş sıcaklıklarında PRF20, PRF40ve PRF 60 yakıtları ile RCCI modda çalıştırılmıştır. 60°C emme giriş havası sıcaklığında maksimum indike termik verimin PRF20 yakıtına göre PRF60 yakıtı ile %7.4 arttığını görmüşlerdir. Uyumaz ve Çınar [24] düşük supap kalkma miktarına sahip kam mekanizmaları ile art gaz miktarının HCCI yanması üzerindeki etkilerini incelemiştir. Emme 5.5-Egzoz 3.5 mm kam mekanizması ile HCCI motorun vuruntudan ve ateşlenememe bölgelerinden uzak çalıştırılabildiğini görmüşlerdir.

Bu çalışmada heksan ve n-heptan yakıtı ve %50-50 karışımları ile tam yükte, 1400 d/d'da çalışan HCCI bir motorda hava fazlalık katsayısının yanma, motor performansı ve CO-HC emisyonları üzerindeki etkileri deneysel olarak araştırılmıştır. Bu amaçla tek silindirli, dört zamanlı benzinli bir motor HCCI motora dönüştürülmüştür. N-heptan yakıtına heksan ilavesi ile silindir basıncı, ısı dağılımı, yanma süresi, indike ortalama efektif basınç (imep), termik verim, çevrimsel farklılıkların değişimi deneysel olarak incelenmiştir.

2. MATERYAL VE METOT (MATERIAL and METHOD)

Heksan yakıtının HCCI yanması üzerindeki etkilerini görmek için motor deneyleri Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Otomotiv Mühendisliği Bölümü, İçten Yanmalı Motorlar Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Deney düzeneğinin şematik görünümü Şekil 1'de görülmektedir. Deneyler kararlı HCCI yanmasının sağlandığı 1400 d/d'da n-heptan, heksan, ve n-heptan / heksan yakıt karışımı ile (H50N50), sabit 60 °C emme havası giriş sıcaklığında yapılmıştır. Hava fazlalık katsayısı 1.9 ile 2.74 arasında değiştirilmiştir. Deney motoru 6500 d/d'da 30kW güç absorbe edebilen DC dinamometreye bağlanmıştır. Deney motorunun teknik özellikleri Tablo 1'de görülmektedir. Motor devri, motor yükü, yakıt enjeksiyon pulsü, ateşleme, emme havası giriş sıcaklığı, motor yağı sıcaklığı gibi parametreler dinamometre kontrol panelinden değiştirilebilmekte ve kontrol edilmektedir. Hava fazlalık katsayısının belirlenmesi için Bosch marka egzoz gaz analiz cihazından yararlanılmıştır.



Şekil 1. Deney düzeneği (The experimental setup)

Yanma analizinin yapılabilmesi için yanma odasına bağlı Kistler 6121 marka silindir basınç sensörü kullanılmıştır. Motor devrinin ve üst ölü nokta bilgisi için krank miline bir turda 1000 puls üreten enkoder bağlanmıştır. Silindir içi basınç verileri 0.36° krank açısı aralıklarla ölçülebilmektedir. Alınan silindir içi basınç sinyalleri yanma analiz cihazı ile yükseltilmiş ve National Instrument marka veri aktarım kartına ham veriler aktarılmıştır. Veri aktarım kartı ile analog silindir basınç sinyalleri dijital verilere dönüştürülerek bilgisayara kaydedilmiştir. Dijital silindir içi basınç sinyalleri Matlab dilinde yazılan bir program ile işlenmiş, ısı dağılımı, yanma safhaları, motor performans parametreleri belirlenmiştir. Bosch marka egzoz gaz analiz cihazı kullanılarak HC, CO ve hava fazlalık katsayısı değerleri belirlenmiştir. Kullanılan egzoz gaz analiz cihazının özellikleri Tablo 2'de verilmektedir.

Tablo 1. Deney motorunun teknik özellikleri (Technical features of the test engine)

Model	Ricardo Hydra
Silindir sayısı	1
Çap x Kurs	80,26 x 88,9 mm
Silindir hacmi	0,54 L
Maksimum devir	5400 d/d
Maksimum güç	15 kW
Sıkıştırma oranı	13/1
Supap sistemi	Üstten tek eksantrikli
Supap kalkma miktarı	Emme supabı 5.5mm Egzoz supabı 3.5 mm
Yakıt sistemi	Port tipi yakıt enjeksiyonu

Tablo 2. Bosch egzoz gaz analiz cihazının teknik özellikleri (Bosch exhaust gas analyzer specifications)

	Ölçüm Aralığı	Hassasiyet
CO (% vol)	0.000-10.00	0.001
CO2 (% vol)	0.00-18.00	0.01
HC (ppm)	0-9999	1
O2 (% vol)	0.00-22.00	0.001
λ	0.500-9.999	0.001
NO (ppm vol)	0-5000	≤ 1

Isı dağılımı hesabı için Termodinamiğin 1. yasasına dayalı aşağıdaki eşitlik kullanılmıştır. Yapılan hesaplamalarda silindir gaz kaçaklarının olmadığı, çevrimde kullanılan gazın ideal gaz olduğu kabulleri yapılmıştır.

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

dQ , dQ_{heat} ve $d\theta$ sırasıyla ısı dağılım oranını, yanma odasından silindir cidarlarına transfer edilen ısıyı ve krank açısını ifade etmektedir. Deneylerde n-heptan ve hekzan yakıtları kullanılmıştır. Kullanılan yakıtların bazı özellikleri Tablo 3’de verilmektedir. Yapılan deneylerde dört farklı test yakıtı kullanılmıştır. Kullanılan test yakıtları ve karışım yüzdeleri Tablo 4’de görülmektedir.

Tablo 3. Deney yakıtlarının bazı özellikleri (Some properties of test fuels)

	n-Hekzan	n-Heptan
Kimyasal formülü	C ₆ H ₁₄	C ₇ H ₁₆
Yoğunluk (kg/m ³)	659	679.5
Oktan sayısı	36	-
Yanma ısısı(kJ/mol)	4163.2	4817
Kaynama noktası (°C)	69	98
Mol kütlesi (g/mol)	86.17	100.16

Tablo 4. Test yakıtları ve karışım yüzdeleri (Test fuels and mixing percentages)

Test yakıtı	Karışım Yüzdeleri
n-heptan	% 100 n-heptan
Hekzan	% 100 hekzan
H50N50	%50 Hekzan/% 50 n-heptan

Vuruntu yoğunluğu maksimum silindir basıncı artış oranı ve motor devrinden etkilenmektedir. Vuruntu yoğunluğu eşitlik (2) ile belirlenmiştir. Bu eşitlikte γ politropik indeksi, $\frac{dP}{dt}$ maksimum basınç artış oranını P_{\max} ve T_{\max} maksimum basınç ve sıcaklıkları göstermektedir.

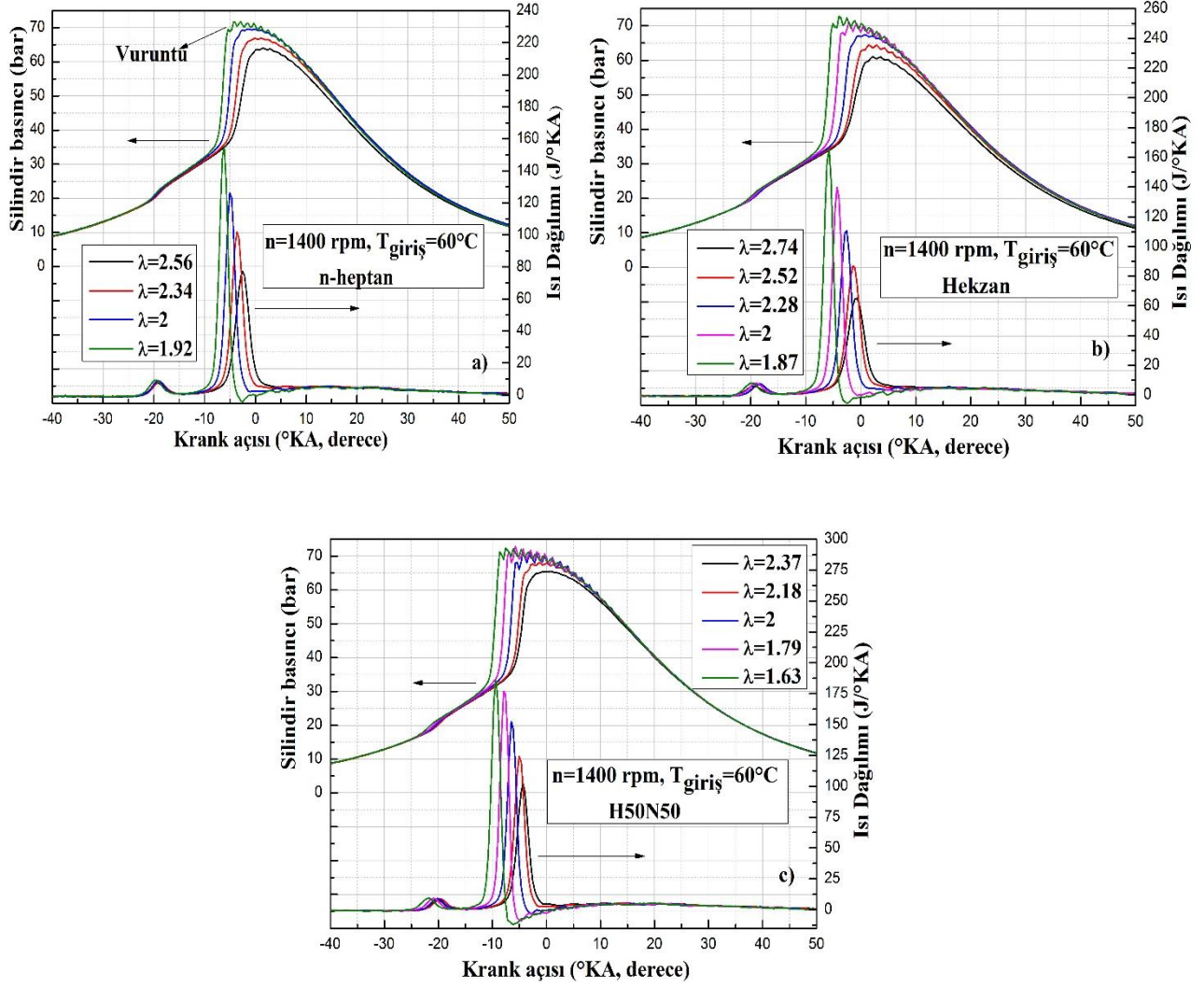
$$RI = \frac{1}{2\gamma} \left(\frac{\beta \left(\frac{dP}{dt} \right)_{\max}}{P_{\max}} \right)^2 \sqrt{\gamma \cdot R \cdot T_{\max}} \quad 2$$

3. BULGULAR ve TARTIŞMA (RESULT and DISCUSSION)

HCCI yanması sıkıştırma stroku öncesi yanma odası termodinamik durumundan direkt etkilenmektedir. Yakıtın kimyasal özellikleri kendiliğinden tutuşma kabiliyeti oksidasyon reaksiyonlarının seyrini değiştirmektedir. Bu noktada yakıtın oktan sayısı HCCI yanmasında görülen vuruntu problemini azaltmakta aynı zamanda yanma fazının kontrol edilebilmesini kolaylaştırmaktadır. Bu çalışmada n-heptan ve hekzan yakıt karışımlarının HCCI yanması üzerindeki etkileri deneysel olarak araştırılmıştır. Şekil 2 heptan ve hekzan yakıt karışımlarının silindir basıncı ve ısı dağılımı üzerindeki etkilerini göstermektedir. Deney motoru HCCI yanma modunda 1400 d/d'da kararlı bir şekilde çalıştırılmıştır. N-heptan ile yapılan deneylerde karışım zenginleştikçe vuruntu eğiliminin arttığı görülmektedir. Tüm test yakıtları için lamda artıkça silindir basıncı ve ısı dağılımı azalmaktadır. Silindire sürülen yakıt enerjisi azaldıkça açığa çıkan ısı miktarı azalmaktadır. Düşük sıcaklık yanması olan HCCI yanmasında iki aşamalı ısı dağılımı görülmektedir. Bunlar düşük sıcaklık yanması ve yüksek sıcaklık yanmasıdır. Düşük sıcaklık yanması yakıt kompozisyonundan oldukça etkilenmektedir. Yüksek sıcaklık yanma reaksiyonları ise yaklaşık 950 K civarında başlamakta ve ana oksidasyon reaksiyonlarını içermektedir [1]. Hekzan yakıtının ilavesi ile vuruntu eğilimi azalmaktadır. Hekzanın oktan sayısının n-heptan yakıtına göre yüksek olması kendiliğinden tutuşma reaksiyonlarının daha geç oluşmasına neden olmaktadır. Bu durum meydana gelen hızlı ve ani ısı dağılımının yavaşlamasına neden olmaktadır. Karışım zenginleştikçe yanma odası sıcaklığı artış göstermekte basınç artış oranı yükselmektedir. Sonuçta istenmeyen vuruntu görülmektedir.

HCCI yanmasının seyri yanma başlangıcından etkilenmektedir. Karışım kompozisyonunun zengin olması yanma odasının genelinde eş zamanlı kendiliğinden gerçekleşen kimyasal oksidasyon reaksiyonlarının hızlı seyretmesine neden olmaktadır. Sonuçta yanma oranı ve silindir içi gaz sıcaklığı artmaktadır. Hekzan yakıtının n-heptan yakıtına ilavesi ve karışımın fakirleştirilmesi ile HCCI yanma fazının kontrol edilebileceği görülmektedir.

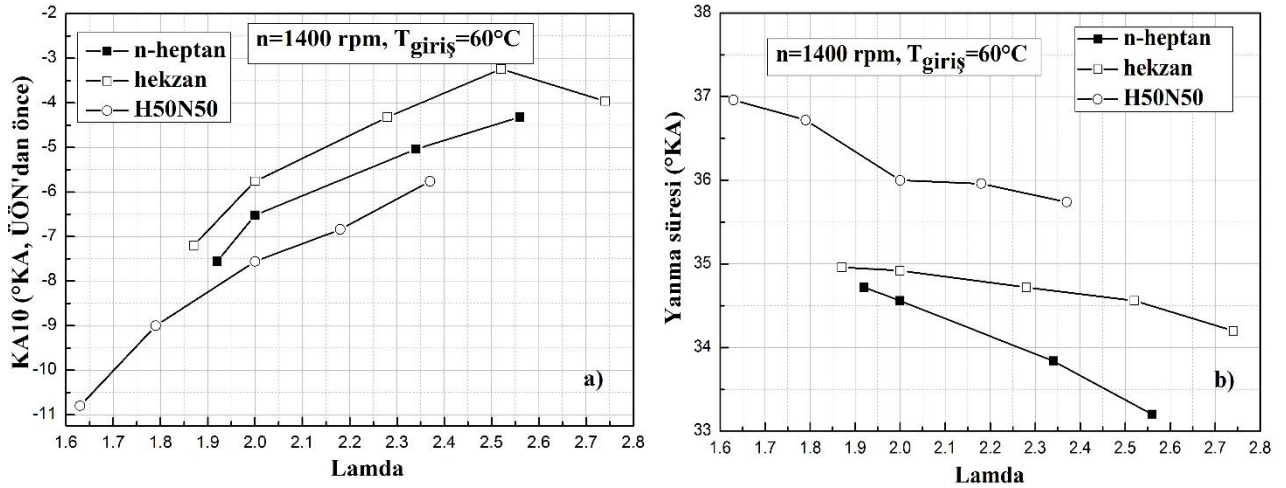
Yapılan çalışmada hava fazlalık katsayısının HCCI yanması üzerindeki etkilerini görmek için yakıt kompozisyonu ve lamda değiştirilmiş, emme havası giriş sıcaklığı 60°C sabitlenmiştir. Lamda arttıkça kendiliğinden tutuşma reaksiyonlarının rötara alındığı yanmanın geciktiği görülmektedir. Karışım yakıtlardaki hekzan yakıtının oranı artmasına rağmen deney motoru $\lambda=2.37$, $\lambda=2.50$ gibi yüksek lamda oranlarında 1400 d/d'da kararlı bir şekilde çalıştırılabilmiştir.



Şekil 2. Silindir basıncı ve ısı dağılımı değişimi (Change of cylinder pressure and heat release)

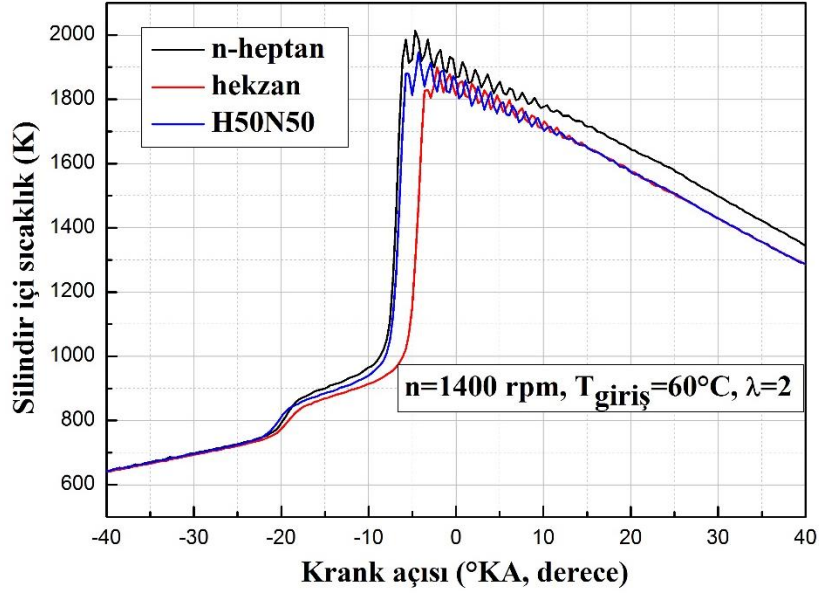
Şekil 3 test yakıtları ile yapılan deneylerde KA10 ve yanma süresinin lamdaya bağlı değişimini göstermektedir. KA10 silindire alınan karışımın %10'unun yanmasını tamamladığı krank açısına karşılık gelmektedir. Literatürde yanma başlangıcı olarak ta ifade edilebilmektedir. Lamda arttıkça tüm test yakıtları için KA10 değerinin ÜÖN'ya yaklaştığı yani yanmanın rötara alındığı görülmektedir. Karışımın fakirleşmesi yanma sonu gaz sıcaklığının azalmasına ve kendiliğinden tutuşmaya başlama şartlarının kötüleşmesine neden olmaktadır. Yakıt moleküllerinin azalması ve açığa çıkan ısı enerjisinin azalması yanma başlangıcını geciktirmektedir. Hekzan yakıtı ile yüksek oktan sayısından dolayı n-heptan yakıtına göre KA10 değerinin rötara alındığı görülmüştür. N-heptan yakıtına hekzan ilave edilmesi ile yanmanın avansa alındığını ifade etmek mümkündür. Özellikle stokiyometrik orana yakın zengin karışımlarda ($\lambda=1.63$ ve $\lambda=1.79$) H50N50 ile yanma başlangıcının daha fazla avansa alındığı görülmektedir. Kimyasal oksidasyon reaksiyonlarının başlayabilmesi için yakıt molekülleri ile oksijen molekülleri daha erken bir araya gelerek yanmanın daha önce başlamasına neden olmaktadır. Yanma analizinde diğer önemli parametre yanma sürecinin ne kadar devam ettiğidir. Şekil 3-b test yakıtları ile yanma süresinin değişimini

göstermektedir. Lamda arttıkça tüm test yakıtları için yanma süresi azalma eğilimi göstermektedir. Minimum yanma süresi düşük vuruntu direncinden dolayı n-heptan yakıtı ile elde edilmiştir. Yakıt karışımlarındaki hekzan oranı arttıkça yanma süresinin uzadığı görülmüştür. Hekzanın n-heptan yakıtına göre yüksek oktan sayısı ve düşük yanma ısısından dolayı toplam yanma süresi artmaktadır. Yanma sonu açığa çıkan daha düşük ısı dağılımı kendiliğinden tutuşma şartlarını kötüleştirir. Bu noktada silindir cidarına yakın yüzeylerde alev yayılım hızı yavaşlamakta ve cidarda yanma gerçekleşmemektedir. Maksimum yanma süresi $\lambda=1.63$ lamda değerinde H50N50 test yakıtı ile 36.96 °KA olarak belirlenmiştir. Karışımın fakirleşmesi yanma sonu gaz sıcaklığının azalmasına ve alevin daha erken sonlandırılmasına neden olmaktadır. Sonuçta yanma süresi kısalmaktadır.



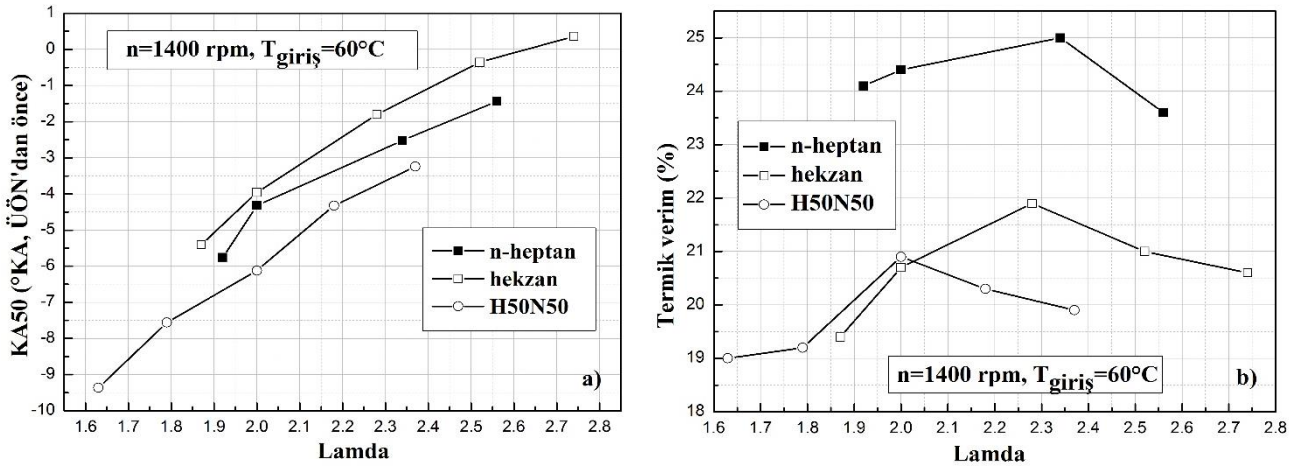
Şekil 3. a) CA10 değişimi (Change of CA10) b) Yanma süresi değişimi (Change of combustion duration)

Şekil 4’de ise hekzan yakıtının silindir içi sıcaklık üzerindeki etkisi görülmektedir. $\lambda=2$ değerinde yapılan deneylerde karışım yakıtlardaki hekzan miktarı arttıkça silindir içi sıcaklığın azaldığı görülmüştür. Maksimum silindir içi sıcaklık n-heptan yakıtı ile elde edilmiştir. N-heptan yakıtının yanma ısısının yüksek olması, oktan sayısının düşük olması silindir içi sıcaklığın daha fazla olmasına neden olmaktadır. Ani ve hızlı bir şekilde gerçekleşen yanma odası gaz sıcaklığı birden artmaktadır. Hekzan ilavesi ile karışımın ısıl enerjisi azalmaktadır. Sonuçta n-heptan yakıtına hekzan ilave edildikçe silindir gaz sıcaklığı azalmaktadır. Aynı zamanda n-heptan yakıtının hekzana göre yoğunluğunun yüksek olması birim hacimde kütlece daha fazla yakıt molekülünün reaksiyona girmesine neden olmakta, yanma odasına salınana ısı artmaktadır. Maksimum silindir içi sıcaklık n-heptan yakıtı ile $\lambda=2$ ‘de 2013 K hekzan ile 1954 K şeklinde tahmin edilmiştir.



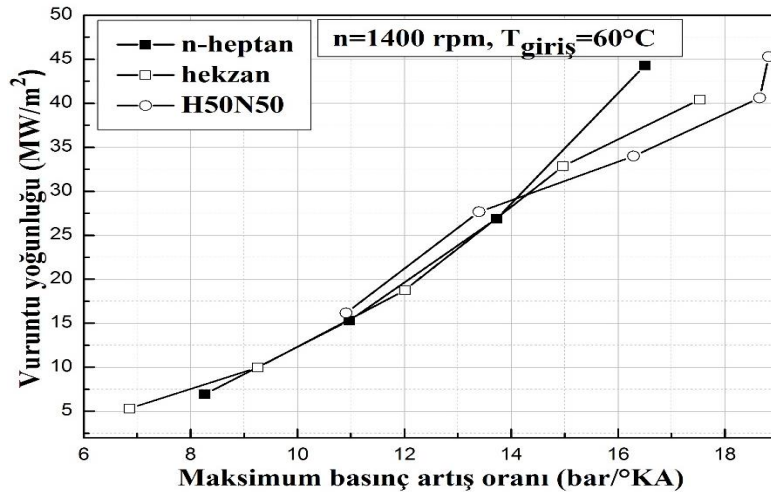
Şekil 4. Hekzan yakıtının silindir içi sıcaklık üzerindeki etkisi (Effect of hexane fuel on in-cylinder temperature)

Kümülatif ısı dağılımı normalize işlemine tabi tutulduğunda yanma safhaları hakkında bize bilgi vermektedir. Yanma safhaları arasında diğer önemli değişken KA50 dir. KA50 karışımının yarısının yanmasını tamamladığı krank açısını ifade etmektedir. Şekil 5-a test yakıtları ile çalışan HCCI motorunda lamdanın KA50 üzerindeki etkilerini göstermektedir. Şekil 5-a incelendiğinde lamda arttıkça KA50 değerinin rötara alındığı görülmektedir. Fakir karışımın kendiliğinden tutuşması sonucu yanma sonu gaz sıcaklığı azalmaktadır. Karışımın yarısının yanmasını tamamlaması için gereken süre uzamaktadır. Zengin karışım oranlarında yakıt konsantrasyonunun yüksek olması kendiliğinden tutuşma temayülünü arttırmaktadır. Hekzanın oktan sayısının yüksek olması KA50 nin rötara alınmasına neden olabilmektedir. Minimum KA50 değerleri H50N50 ile elde edilmiştir. Fakir karışımlarda silindir içi sıcaklık azalmakta KA50 gecikmektedir. Test yakıtlarının oktan sayılarının düşük olması KA50 değerinin ÜÖN'dan önce elde edilmesine neden olmuştur. KA50 ile termik verim arasında yakın bir ilişki bulunmaktadır. Termik verimin yüksek olabilmesi için KA50'nin ÜÖN'dan hemen sonra (5-10 °KA) elde edilmesi gerekir. Şekil 5-b'de görüldüğü gibi KA50 rötara alındıkça termik verimin arttığı görülmektedir. Tüm test yakıtları için termik verim belli bir lamda değerine kadar artmakta daha sonra azalmaktadır. Karışımın çok fazla fakirleşmesi silindir cidarında alevin sönmeye neden olmakta, yanma esnasında gaz sıcaklığını azaltmaktadır. Sonuçta termik verim azalmaktadır. Termik verim karışımın biraz fakirce olduğu hava yakıt oranlarında artış göstermektedir. Maksimum termik verim n-heptan yakıtı ile $\lambda=2.34$ 'de %25 olarak hesaplanmıştır. Hekzan yakıtı ile termik verim n-heptana göre azalmıştır. Hekzan yakıtının ısı enerjisi ve yoğunluğunun n-heptana göre düşük olması termik verimin azalmasına neden olmuştur.



Şekil 5. a) KA50 değişimi (Change of CA50) b) Termik verim (Thermal efficiency)

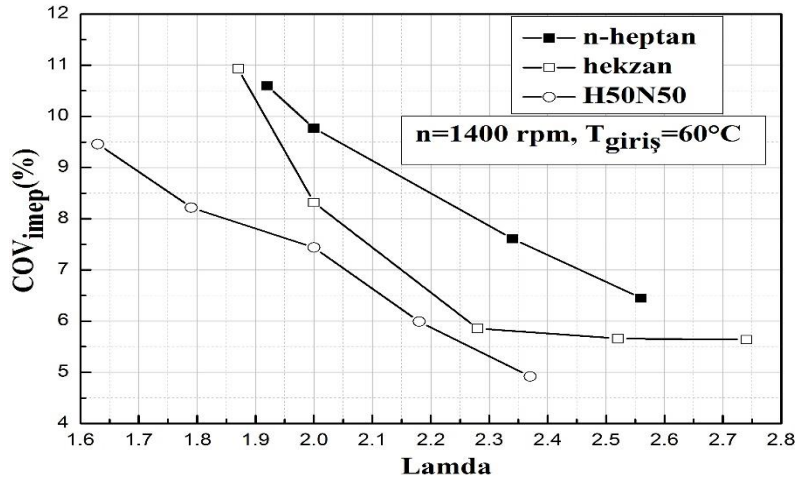
Vuruntu yoğunluğu motor devri, maksimum basınç artış oranına bağlı olarak hesaplanan bir parametredir. Maksimum basınç artış oranı çevrimde krank açısı değişimine karşılık maksimum basınç farkı değişimini ifade etmektedir. Maksimum basınç artış oranına bağlı vuruntu yoğunluğu değişimi Şekil 6'da görülmektedir. Vuruntu yoğunluğu maksimum basınç artış oranı ile birlikte artmaktadır. Karışım zenginleştikçe yanma odasındaki yakıt enerjisi artmakta, yanma sonucu açığa daha fazla ısı çıkmaktadır. Bu durum silindir içinde basıncın aniden artmasına neden olmaktadır. N-heptan ve hexan yakıtları incelendiğinde vuruntu yoğunluğu açısından belirgin bir fark görülmemektedir. N-heptana hexan ilave edildiğinde vuruntu yoğunluğunun arttığı görülmüştür. Sabit lamda değerinde H50N50 yakıtı ile n-heptana göre vuruntu yoğunluğu artmıştır. Maksimum vuruntu yoğunluğu H50N50 yakıtı ile hesaplanmıştır.



Şekil 6. Maksimum basınç artış oranına bağlı vuruntu yoğunluğu (Knock intensity due to maximum pressure rise rate)

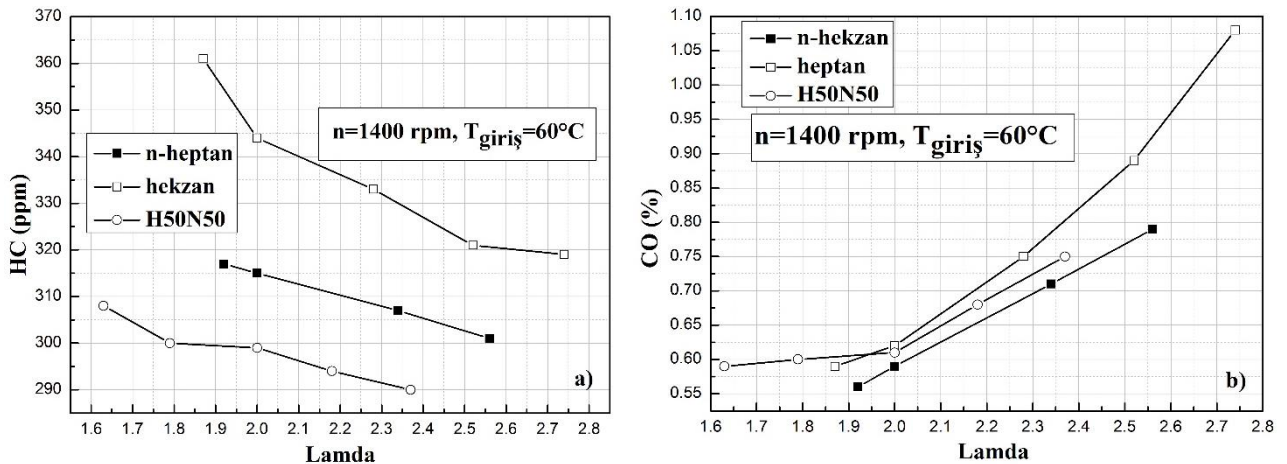
Silindire alınan karışım kompozisyonu çevrimden çevrime değişmektedir. Bir önceki çevrimden kalan art gazlar, segman ve supaplardan kaçan gazlar sıkıştırma stroku sonundaki karışımın halini ve termodinamik şartları değiştirmektedir. Sonuçta elde edilen silindir basıncı değişmekte ve çevrimsel farklılıklar görülmektedir. Literatürde çevrimsel farklılıkların %10'u geçmemesi istenmektedir [2]. Özellikle yanma odasında kalan art gazlar taze karışımın özelliğini bozmakta ısı dağılımı azalmaktadır. Şekil 7'de lamdaya bağlı çevrimsel farklılıklar görülmektedir. Lamda arttıkça çevrimsel farklılıklar azalmaktadır. Karışımın fakirleşmesi ile daha stabil ve kararlı HCCI yanmasının sağlandığı görülmektedir. Yüksek lamda değerlerinde ısı dağılımı yavaşlamakta ve azalmaktadır. Yakıt enerjisinin azalması oksidasyon oranını azaltmaktadır. N-heptan yakıtı ile karşılaştırıldığında COV_{imep} hexan ve H50N50 yakıtları ile azalmıştır.

Ancak H75N25 yakıtı ile maksimum çevrimsel farklılık görülmüştür. Hekzanın oktan sayısının düşük olması yanmanın daha kararlı sağlanmasına neden olduğu ifade edilebilir. Fakat yüksek oranda hekzan ilavesi ile karışımın ısıl enerjisi azalmakta ve çevrimsel farklar artmaktadır.



Şekil 7. Çevrimsel farklılıklar (Cyclic variations)

HCCI yanması sıkıştırma ile ateşlemeli yanmadan kaynaklanan NO_x ve is emisyonlarını eş zamanlı azaltabilmesine karşın fakir karışım ve düşük sıcaklık yanmasından dolayı HC ve CO formasyonları artış göstermektedir. Homojen fakir karışımın düşük sıcaklıkta yanması yanmanın tamamlanmasını engelleyebilmektedir. Bunun yanında alev silindiri cidarında sönmekte HC emisyonları oluşmaktadır. Şekil 8'de test yakıtları ile yapılan deneylerde lamdaya bağlı HC ve CO emisyonlarının değişimi görülmektedir. Şekil 8-a incelendiğinde lamda arttıkça HC emisyonlarının azaldığı görülmektedir. Yoğunluğu düşük test yakıtlarının oksidasyonu için hava fazlalığına ihtiyaç vardır. Karışımın fakirleşmesi ile yakıtların ihtiyaç duyduğu oksijen yanma odasında bulunmakta, kimyasal oksidasyon reaksiyonları iyileşmektedir. Maksimum HC hekzan yakıtı ile $\lambda=1.87$ 'de 361 ppm ölçülmüştür. Karışım zenginleşmesi yakıt moleküllerinin oksijen molekülleri ile reaksiyona girme imkânını kısıtlamakta, yanma sonu gaz sıcaklığı azalmaktadır. Ancak karışım yakıtları ile HC emisyonlarının azaldığı görülmüştür. Hekzan yakıtı ile n-heptan yakıtı karıştırıldığında kendiliğinden tutuşma özellikleri iyileştirilebilmekte, karışım daha önce tutuşmaya başlamaktadır. HCCI yanması yanma başlangıcından oldukça etkilendiğinden yanma süreci daha hızlı alev hızı ile iyileşmektedir. Sonuçta HC emisyonları azalmaktadır.



Şekil 8. a) HC emisyonları (HC emissions) b) CO emisyonları (CO emissions)

CO eksik oksijen ve düşük reaksiyon sıcaklığına bağlı olarak oluşan eksik yanma ürünüdür. Şekil 8-b incelendiğinde lamda arttıkça CO artmaktadır. Karışımın fakirleşmesi HCCI yanmasında silindiri içi gaz sıcaklığının azalmasına CO₂ formasyonuna engel olmaktadır. Yanma odasında yeterli oksijen konsantrasyonu olmasına rağmen düşük reaksiyon sıcaklığı CO oluşumunu hızlandırmaktadır. Tüm test

yakıtları için lamda arttıkça CO artmaktadır. Maksimum CO heksan ile $\lambda=2.74$ 'de %1.08 ölçülmüştür. Minimum CO emisyonu sabit lamda değerinde n-heptan ile ölçülmüştür. Heksana belli oranda n-heptan ilavesi yanma reaksiyonlarını iyileştirmiş CO azalmıştır. N-heptan yakıtının düşük vuruntu direnci kendiliğinden yanma reaksiyonlarının hızlı seyretmesine neden olmaktadır. Bu durum yanma hızının ve yanma oranının artmasına neden olduğu görülmektedir.

4. SONUÇ (CONCLUSION)

HCCI yanmasının en önemli problemlerinden biri yüksek yüklerde vuruntu sorunudur. Hızlı ve ani ısı dağılımına bağlı olarak yanma hızı aşırı artmakta, piston üzerine birim krank açısı değişimine bağlı olarak uygulanan basınç artmaktadır. Meydana gelen bu vuruntu motor parçalarının ömrünü azaltmakta, HCCI motorun çalışma aralığı daralmaktadır. Bu noktada hava-yakıt oranı ve farklı özelliklerde yakıtların kullanılması ile HCCI yanması kontrol edilebilmektedir. Bu çalışmanın amacı n-heptan yakıtına heksan ilave edilerek yanma karakteristikleri üzerindeki etkilerini deneysel olarak araştırmaktır. N-heptan ile özellikle düşük lamda değerlerinde vuruntu görülmüştür. Heksan ilavesi ile vuruntu eğiliminin azaldığı görülmüştür. 1400 d/d'da yapılan deneylerde deney motorunun karışım yakıtlar ile (H50N50) $\lambda=1.63$ - $\lambda=2.50$ lamda aralığında kararlı bir şekilde çalıştığı görülmüştür. H50N50 yakıtı ile diğer yakıtlara göre yanma başlangıcının avansa alındığı karışım fakirleştikçe tüm test yakıtları için yanmanın geciktirildiği görülmüştür. Karışım yakıtlar ile heksanın düşük ısı enerjisi ve yoğunluğundan dolayı termik verimin azaldığı görülmektedir. Aynı zamanda H50N50 ve heksan yakıtları ile n-heptana göre çevrimsel farklılıklar azalmıştır. Benzer şekilde karışım yakıtlar ile HC emisyonlarının n-heptana göre azaltılabileceği görülmüştür. Ancak CO emisyonları n-heptan yakıtına göre artış göstermektedir. Sonuçta n-heptan yakıtına belli oranlarda heksan ilavesi ile vuruntu temayülünün azaltılabileceği, HCCI motorlarda çalışma aralığının genişletilebileceği görülmüştür. Heksanın n-heptana göre yüksek oktan sayısı yanmanın kontrol edilmesinde önemli rol oynadığı görülmektedir.

KISALTMALAR (ABBREVIATIONS)

CO	: Karbonmonoksit
HC	: Hidrokarbon
HCCI	: Homojen dolgulu sıkıştırma ile ateşlemeli yanma
HFk	: Hava fazlalık katsayısı
EGR	: Egzoz gazı geri dönüşümü
RCCI	: Reaktif kontrollü sıkıştırma ile ateşlemeli yanma
dQ	: Isı dağılımı (joule)
dQ_{heat}	: Yanma odasından silindir cidarlarına transfer edilen ısı (joule)
$d\theta$: Krank açısı değişimi (derece)
V	: Silindir hacmi (m^3)
P	: Silindir basıncı (bar)
k	: Özgül ısıların oranı
γ	: Politropik indeks
P_{max}	: Maksimum silindir basıncı (bar)
T_{max}	: Maksimum silindir sıcaklığı (K)
dP/dt	: Maksimum basınç artış oranı (bar/derece)

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Zhao, H., (2007). *HCCI and CAI Engines for the Automotive Industry*, London, England: Woodhead Publishing Limited, 5-15.
- [2] Heywood, J.B., (1988), *Internal Combustion Engines Fundamentals*, New York, USA: McGraw-Hill, 3-20.
- [3] Eng J. A., Characterization of Pressure Wave Oscillation in HCCI Combustion, *SAE Technical Paper*, 2002-01-2859, (2002).
- [4] Stone, R., (1999), *Introduction to Internal Combustion Engines*, Macmillan Press Ltd, ISBN 0-333-74013-0, Tesseroux, I.; Toxicoll, Lett., 149, 295-300.
- [5] 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).
- [6] Benajes, J., Molina, S., García, A., Belarte, E., Vanvolsem, M., 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, (2014).
- [7] Kokjohn, SL, Hanson, RM, Splitter, DA, RD., Experiments and modeling of dual-fuel HCCI and PCCI combustion using in-cylinder fuel blending, *SAE Technical Paper*, 2009-01-2647, (2009).
- [8] 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).
- [9] Tsurushima, T., A new skeletal PRF kinetic model for HCCI combustion, *Proceedings of the Combustion Institute*, 32: 2835-2841, (2009).
- [10] Splitter D., Reitz R., Hanson R., High efficiency, low emissions RCCI combustion by use of a fuel additive, *SAE International*, 2010-01-2167, (2010).
- [11] Polat, S, An experimental study on combustion, engine performance and exhaust emissions in a HCCI engine fuelled with diethyl ether–ethanol fuel blends. *Fuel Processing Technology*, 143: 140-150, (2016).
- [12] Dempsey. A., Walker, N., Gingrich, E., Reitz, RD., Comparison of Low Temperature Combustion Strategies For Advanced Compression Ignition Engines With a Focus on Controllability. *Combustion Science Technology*, 86, 2, 210-41, (2014).
- [13] Solmaz, H., Combustion, Performance and Emission Characteristics of Fusel Oil in a Spark Ignition Engine. *Fuel Processing Technology*, 133, 20-28, (2015).
- [14] Splitter, D., Wissink, M., DelVescovo, D., Reitz, R., RCCI Engine Operation Towards 60% Thermal Efficiency. *SAE International*, 2013-01-0279, (2013).
- [15] Hanson, R., Reitz, R., Transient RCCI Operation in a Light-Duty Multi-Cylinder Engine. *SAE Technical Paper*, 2013-24-0050, (2013).
- [16] 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. 1-60, (2014).
- [17] 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).

- [18]Çınar, C., Uyumaz, A., Solmaz, H., Şahin, 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 Processing Technology*, 130, 275–281, (2015).
- [19]Çınar, C., Uyumaz, A., Solmaz, H., Topgöl, T., Effects of valve lift on the combustion and emissions of a HCCI gasoline engine, *Energy Conversion and Management*, 94, 159–168, (2015).
- [20]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).
- [21]Uyumaz, A., Solmaz, H., Boz, F., Yılmaz, E., Polat, S., Reaktif Kontrollü Sıkıştırma İle Ateşlemeli (RCCI) Bir Motorda Lamdanın Yanma Karakteristiklerine Etkileri, *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 17, 1146-1156, (2017).
- [22]Polat, S., Yücesu, H.S., Kannan, K., Uyumaz, A., Solmaz, H., Shahbakhti, M., Experimental Comparison of Different Injection Timings in an HCCI Engine Fueled with N-Heptane, *International Journal of Automotive Science and Technology*, 1, 1, 1-6 (2017).
- [23]Uyumaz, A., Solmaz, H., Emme Havaşı Giriş Sıcaklığı ve Ön Karışımli Yakıt Oranının RCCI Yanma Karakteristiklerine ve Motor Performansına Etkileri, *Politeknik Dergisi*, 20 (3) : 689-698, (2017).
- [24]Uyumaz, A., Çınar, C., (2015). Understanding the Effects of Residual Gas Trapping on Combustion Characteristics, Engine Performance and Operating Range in a HCCI Engine, *Proceedings of 48th The IIER International Conference*, 21-27, Barcelona Spain.