



RCCI BİR MOTORDA FARKLI GİRİŞ SICAKLIKLARI İÇİN DİREKT ENJEKSİYON ZAMANLAMASI İLE YANMA FAZININ KONTROLÜ

Hamit SOLMAZ * ve Duygu İPÇİ **

***Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Otomotiv Mühendisliği Bölümü
06500 Teknikokullar, Ankara

*hsolmaz@gazi.edu.tr, ORCID: 0000-0003-0689-6824

**duyguipci@gazi.edu.tr, ORCID: 0000-0002-8862-7662

(Geliş Tarihi: 21.12.2019, Kabul Tarihi: 21.06.2020)

Özet: Karayolu ulaştırma sektörü için emisyon regülasyonlarının giderek sıkılaşması, içten yanmalı motorlarda yeni emisyon azaltma tekniklerinin uygulanmasını zorunlu kılmaktadır. Egzoz emisyonlarının azaltılabilmesi için yanma sonrasında veya yanma sırasında birtakım önlemler alınması gerekmektedir. Düşük sıcaklık yanma çevrimleri hem düşük emisyon seviyeleri hem de yüksek enerji dönüşüm oranı sağlamaları nedeniyle popüler bir araştırma konusudur. Reaktif kontrollü sıkıştırma ile ateşlemeli (RCCI) yanma modu diğer düşük sıcaklık yanma modlarına göre yanma fazının daha kontrol edilebilir olması ve daha geniş bir çalışma aralığı sunabilmesi bakımından avantajlıdır. Ancak RCCI modunda motorun her çalışma şartında en yüksek verimi sağlayabilmesi için direkt enjeksiyon püskürtme başlangıcının anlık olarak kontrol edilmesi gerekir. Bu çalışmada sıkıştırma oranı 9,2 olan direkt enjeksiyonlu bir benzin motoru RCCI modda çalıştırılarak, püskürtme başlangıcı yanma fazının (KA50) anlık değişimine göre kontrol edilmiş ve farklı giriş sıcaklıkları için püskürtme avans haritası ile çalışma haritaları elde edilmiştir. En geniş çalışma aralığı 80°C giriş sıcaklığında sağlanmıştır. Minimum özgül yakıt tüketimi 232,3 g/kWh olarak ölçülmüştür. Kullanılan motorun sıkıştırma oranı çok düşük olmasına rağmen özgül yakıt tüketimi değerlerinin oldukça düşük olması yanma fazı kontrolünün başarılı olduğunu göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Düşük sıcaklık yanması, RCCI, yanma fazı, motor kontrolü.

CONTROL OF COMBUSTION PHASE WITH DIRECT INJECTION TIMING FOR DIFFERENT INLET TEMPERATURES IN AN RCCI ENGINE

Abstract: The increasingly stringent emission regulations for the road transport sector require the implementation of new emission reduction techniques for internal combustion engines. In order to reduce exhaust emissions, some precautions must be taken after or during combustion. Low temperature combustion cycles are a popular research subject because they provide both low emission levels and high energy conversion rate. Reactive controlled compression ignition (RCCI) combustion mode is advantageous in that the combustion phase is more controllable and offers a wider operating range than other low temperature combustion modes. However, in RCCI mode, the start of the direct injection must be controlled instantaneously in order to ensure the highest efficiency in every operating condition. In this study, a direct injection gasoline engine with a compression ratio of 9,2 was operated in RCCI mode, and the start of the direct injection was controlled according to the instantaneous change of the combustion phase (KA50) and the injection advance map and operation maps were obtained for different inlet air temperatures. The widest operating range was achieved at an inlet temperature of 80 °C. The minimum specific fuel consumption was measured as 232,3 g/kWh. Although the compression ratio of the engine used is very low, the specific fuel consumption values are quite low, which is an indication of successful combustion phase control

Keywords: Low temperature combustion, RCCI, combustion phase, engine control

KISALTMALAR

ÜÖNs	Üst ölü noktadan sonra
ÜÖNö	Üst ölü noktadan önce
AÖNö	Alt ölü noktadan önce
KA50	Toplam ısının %50'sinin açığa çıktığı krank açısı
RCCI	Reaktif kontrollü sıkıştırma ile ateşlemeli yanma
PR	Ön karışım oranı
EGR	Egzoz gazı resirkülasyonu
IMEP	İndike ortalama efektif basınç [bar]

°KA	Krank açısı derecesi
LTC	Düşük sıcaklıkta yanma
MPPR	Maksimum basınç artış oranı
RON	Araştırma oktan sayısı
ÜÖN	Üst ölü nokta
ÖYT	Özgül yakıt tüketimi

SEMBOLLER

A	Isı transferi yüzey alanı [m ²]
λ	Lambda

dQ	Isı dağılımı
$d\theta$	Krank açısı değişimi
h_g	Isı taşınım katsayısı [W/m^2C]
n	Motor hızı [rpm]
n_c	Politropik üs
P	Silindir basıncı [bar]
T_g	Silindir içi gaz sıcaklığı [$^{\circ}C$]
T_d	Silindir duvar sıcaklığı [$^{\circ}C$]
V	Silindir hacmi [m^3]

GİRİŞ

Günümüzde ulaştırma ve taşımacılık sektöründe karayolu ulaşımı yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Artan çevre kirliliği ve yüksek yakıt maliyetlerine rağmen, bu sektörde güç ihtiyacının büyük bir kısmı halen içten yanmalı motorlarla karşılanmaktadır (Ardebili, 2020). Emisyon regülasyonlarındaki baskılara rağmen elektrikli veya hibrit taşıtlar pazarda yaygınlaşma konusunda sıkıntı yaşamaktadırlar. Batarya problemleri, yüksek maliyet, şarj süresi, şarj istasyonu yetersizliği ve ülke altyapılarının mevcut durumu gibi birçok neden elektrikli taşıtlara geçişi zorlaştırmaktadır (Solmaz ve Kocakulak, 2018; Solmaz ve Kocakulak 2020). Bu nedenle kısa vadede içten yanmalı motorların popülerliğini korumaya devam edeceği öngörülebilir.

İçten yanmalı motorlar yüksek güç yoğunluğuna sahip olduklarından birçok alanda tercih edilmektedirler. Ancak çevreci endişelerin yanı sıra petrol kaynaklarının orta vadede tükeneceği konusunda oluşan ortak algı, içten yanmalı motorlarda bir yandan emisyonların azaltılmasını zorunlu kılarken, diğer yandan verimlilik artışının da sağlanması gerektiğini göstermektedir (Ardebili ve ark., 2018; Kocakulak ve Solmaz, 2019). Buji ile ateşlemeli motorlar uygun çalışma şartları sağlandığında katalitik konvertör ve direkt enjeksiyonlu benzin motorlarında ilave olarak bir azot oksit (NO_x) tutucu bir filtre kullanımıyla egzoz emisyonları istenilen seviyede tutulabilmektedir. Ancak buji ile ateşlemeli motorların en büyük dezavantajı düşük enerji dönüşüm verimlilikleridir. Buji ile ateşlemeli motorlarda vuruntu nedeniyle sıkıştırma oranı istenildiği kadar arttırılmadığından termik verim sıkıştırma ile ateşlemeli motorlara göre daha düşük mertebelerde kalmaktadır (Celikten ve ark., 2015). Ağır hizmet sektöründe sıkıştırma ile ateşlemeli motorların tercih edilme nedeni de sahip oldukları yüksek termik verimleridir. Sıkıştırma ile ateşlemeli motorlar için en büyük handikap yüksek miktarda NO_x ve is emisyonu salınımlarıdır (Ardebili ve ark., 2020; Çelik ve ark., 2016; Solmaz ve ark., 2016). Daha da önemlisi yanma sırasında bu iki emisyonun eş zamanlı olarak azaltılabilmesinin mümkün değildir ve yanma sonrası emisyon azaltma teknikleri oldukça pahalıdır. Bu nedenle dünya üzerinde birçok ülke öncelikli olarak binek araç sınıfında dizel motor kullanımını durduracağını açıklamıştır.

Geleneksel yanma metotlarında görülen bu sorunlardan dolayı araştırmalar alternatif yanma modları üzerinde

yoğunlaşmıştır. İçten yanmalı motorlar için bu amaca yönelik olarak düşük sıcaklık yanma çevrimi adı verilen farklı yanma modları üzerinde çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Homojen dolgululu sıkıştırma ile ateşlemeli (HCCI) yanma, ön karışimli sıkıştırma ile ateşlemeli (PCI) yanma ve reaktif kontrollü sıkıştırma ile ateşlemeli (RCCI) yanma üzerinde çalışılan alternatif yanma modlarından (Uyumaz 2020). HCCI yanması ilk olarak Onishi ve arkadaşları tarafından 1979 yılında tanıtılmıştır (Onishi ve ark., 1979). HCCI yanma modunda hava ve yakıt buji ile ateşlemeli motorlarda olduğu gibi homojen olarak hazırlanır ancak karışımın tutuşturulması buji ile değil sıkıştırma ile ateşlemeli motorlarda olduğu gibi kendi kendine gerçekleşir. Bu yanma modlarında sıkıştırma ile ateşlemeli motorlarda olduğu gibi yüksek sıkıştırma oranına ihtiyaç duyduğundan termik verimleri yüksektir. Karışım homojen şekilde hazırlandığından is emisyonu problemi bulunmamaktadır. Bununla birlikte benzinli motorlarla kıyaslandığında oldukça fakir karışım oranları ile çalıştıklarından yanma sırasında sıcaklık artışı azalır ve NO_x emisyonu da görülmez (Solmaz, 2020; Calam, 2019a; Polat, 2020). Yanma sıcaklıklarının düşük olması soğutma suyuna kaybedilen ısı miktarını da azaltacağından motorun verimi daha da yükselecektir. Ancak bu yanma modlarındaki en büyük sorun yanma başlangıcı ve yanma fazının kontrol edilememesidir. Bununla birlikte yanma sıcaklıklarının düşük olması HC ve CO emisyonlarını arttırmaktadır. Yanma, yakıtın özellikleri ve silindir içi sıcaklığa bağlı olarak kendi kendine başladığından, her çevrimde yanma başlangıcı ve yanma hızı farklılık göstermektedir. Bu durum bazen yanmanın istenilenden çok önceye bazen de çok sonraya kaymasına neden olmaktadır ve bunun sonucu olarak şiddetli vuruntu, termik verimde azalma gibi sorunlar ortaya çıkmaktadır. Ayrıca yüksek yüklerde artan vuruntu ve düşük yüklerde görülen teklemeye sorunu nedeniyle HCCI yanma moduyla motorun çalışma aralığı da oldukça kısıtlı kalmaktadır. Yanma fazının kontrol edilememesi ve çalışma aralığının darlığı HCCI motorun önündeki en büyük engel olarak görülmektedir (Halis ve ark., 2018; Calam 2020a). Bu problemlerin giderilebilmesi için çok sayıda araştırma yapılmıştır. Dahili ve harici egzoz gaz geri dönüşümü uygulaması (EGR), alternatif yakıt kullanımı (Calam ve ark., 2020b), girdap oranı (Christensen ve ark., 2002), sıkıştırma oranının değiştirilmesi (Calam ve ark., 2019a; Haraldsson ve ark., 2002), enjeksiyon zamanlaması ve basıncı (Sjöberg ve ark., 2002; Helmantel ve ark., 2004), kam zamanlaması (Polat ve ark., 2019, Johansson ve ark., 2009) ve giriş hava sıcaklığının değiştirilmesi (Lida ve ark. 2003, Calam ve İçingür, 2019b) gibi pek çok uygulama denemiş ancak istenilen seviyede bir iyileşme sağlanamamıştır.

RCCI yanma modu HCCI yanma modunda görülen sorunların çözümüne imkan sağlayabilmek adına geliştirilmiştir. Reitz ve ark. (Reitz ve ark., 2013) tarafından 2013 yılında patenti alınan RCCI yanma modunda çift yakıt ve katmanlı yakıt enjeksiyonu stratejisi aynı anda uygulanmaktadır. RCCI modunda karışımın hazırlanabilmesi için düşük reaktiviteli yakıt,

genellikle yüksek uçuculuğa sahip ve oktan sayısı yüksek olan bir yakıt, port yakıt enjeksiyonu ile emme manifolduna püskürtülür. Silindir içerisinde hava ile karışan yakıt piston tarafından sıkıştırılmaya başlanır ve piston üst ölü noktaya (ÜÖN) doğru ilerlerken belirli bir krank açısında düşük reaktiviteli yakıt ve hava karışımının üzerine yüksek reaktiviteli yakıt püskürtülür. Kendi kendine tutuşma özellikleri iyi olan yüksek reaktiviteli yakıt direkt enjeksiyon sistemi ile yüksek basınçta silindire püskürtüldüğünden daha kolay atomize olur ve bu durum düşük is oluşumu için homojen hava yakıt karışımı oluşturulabilmesine imkan verir. Yanmanın başlangıcı yüksek reaktiviteli yakıtın silindire püskürtülüp karışmasından hemen sonra başladığından yanma başlangıcı yüksek reaktiviteli yakıtın püskürtme başlangıcı ile kontrol edilebilmektedir. Yanma başlangıcı düşük reaktiviteli yakıt ile kontrol edilirken yanma hızı ve ısı yayılımı yüksek reaktiviteli yakıtın özellikleri ile kontrol edilmektedir. Böylece oluşturulan homojen karışım sayesinde is emisyonlarını sıfıra indirmekte, düşük yanma sıcaklığı NOx oluşumunu engellemekte ve kontrollü yanma sayesinde daha yüksek termik verim ve daha geniş çalışma aralığı elde edilebilmektedir (Kokjohn ve ark., 2009).

Düşük sıcaklık çevrimleri ile ilgili çalışmaların birçoğunda dizel yakıtı veya benzin yakıtı kullanılmıştır. Her iki yakıtın da kendine göre avantaj ve dezavantajı bulunmaktadır. Benzin yüksek uçuculuk özelliği sayesinde düşük basınçlı püskürtme sistemi kullanılsa bile kolayca homojen karışım oluşturabilme yeteneğine sahiptir. Ancak kendi kendine tutuşma yeteneği kötü olduğundan özellikle düşük yüklerde yanma başlatılamamaktadır. Aksine dizel yakıtının kendi kendine tutuşma özellikleri oldukça iyidir. Fakat bu özellik yüksek yüklerde yanma kontrolünü zorlaştırmaktadır (Liu ve ark., 2008, Kokjohn ve ark., 2009). Kokjohn, her iki yakıtın bu eksikliklerini dikkate alarak gerçekleştirdiği çalışmayla RCCI fikrinin doğmasına zemin oluşturmuştur (Kokjohn ve ark., 2009). Bu çalışmada karışım teşkili benzin port enjeksiyon ile, dizel yakıtı ise emme supabı kapandıktan sonra direkt enjeksiyon sistemi ile püskürtülerek elde edilmiştir. Uygun yakıt reaktivitesi elde edildiğinde sadece benzin ya da dizel kullanımına göre çok daha düşük yakıt tüketimi değerlerinin elde edilebildiği ve çalışma aralığının çok daha genişletilebildiği tespit edilmiştir. Ayrıca bu strateji ile US 2010 ağır hizmet sınıfı emisyon regülasyonlarının egzozda hiçbir ilave sisteme ihtiyaç duyulmadan sağlanabildiği ve bu sırada %50 termik verime ulaşılabilirdiği ifade edilmiştir. Kokjohn ve ark. (Kokjohn ve ark., 2011) tarafından gerçekleştirilen diğer bir çalışmada hem hafif hem de ağır hizmet tipi motorda RCCI yanma modu denenmiştir. RCCI yanma gerçekleştirilen her iki motor tipinde de NOx emisyonları 0,05 g/kWh ve is emisyonları 0,01 g/kWh değerlerinin altında kalırken indike motor verimi % 50'nin üzerine çıkmıştır. Hanson ve ark. (Hanson ve ark., 2011) düşük yüklerde yakıt özelliklerinin RCCI yanması üzerine etkilerini incelemek amacıyla bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada hem çift yakıt stratejisi hem de tek yakıt olarak benzin ve tutuşma iyileştirici

olarak 2-etilheksilnitrat katkısı kullanılmıştır. Katkı ilavesiyle tek yakıt olarak benzin kullanıldığında %54 seviyesinde indike termik verim elde edilirken US 20110 emisyon normlarının karşılanabildiği tespit edilmiştir. Tek yakıt konsepti üzerine gerçekleştirilen diğer bir çalışmada setan arttırıcı katkı maddesi di-terciyerbütül peroksit direkt enjeksiyonla püskürtülen benzine katkı maddesi olarak ilave edilmiştir. Benzine hacimsel olarak yapılan %1,75 katkı maddesi ilavesiyle benzinin dizel yakıt tutuşma özelliği sergilediği belirtilmiştir. Çalışmada indike termik verimin %57 seviyesine ulaştığı ve emisyon standartlarının karşılanabildiği ifade edilmiştir. Direkt enjeksiyonda tek ve çift yakıt enjeksiyonu stratejisi uygulanan bir diğer çalışmada enjeksiyon zamanlamasının RCCI yanmasına etkisi incelenmiştir. Bu çalışmada port enjeksiyonda izooktan ve direkt enjeksiyonda ise n-heptan referans yakıtları kullanılmıştır. Direkt enjeksiyon zamanlamasının normalden erken yapılması karışımın daha homojen olmasına ve yanmanın HCCI yanmasına yaklaşmasına neden olduğu belirtilmiştir. Enjeksiyonun daha geç yapılması ise yanmanın dizel yanmasına doğru kaymasına yol açtığı ifade edilmiştir. Direkt enjeksiyonun tek kademe yerine çift kademeli olarak yapılmasının ise termik verimde %1'lik bir artışa imkan sağlamakla birlikte, CO ve HC emisyonlarını azalttığı belirlenmiştir (Splitter ve ark., 2011). Uyumaz ve ark. (Uyumaz ve ark., 2016) tarafından gerçekleştirilen bir çalışmada hava fazlalık katsayısındaki değişimin RCCI yanması üzerindeki etkisi incelenmiştir. Çalışmada izooktan ve n-heptan referans yakıtları kullanılırken testler %40 ön karışım oranında gerçekleştirilmiştir. Silindire gönderilen yakıt miktarı arttıkça yanma başlangıcının geciktiği belirtilmiştir. Bu durumun daha fazla yakıtın buharlaşması sonucu silindir sıcaklığını düşürmesinden kaynaklandığı ifade edilmiştir. Hava fazlalık katsayısı arttıkça yakıt tüketiminin azaldığı ve termik verimin arttığı tespit edilmiştir. Hava fazlalık katsayısı 2,65 de çevrimsel farklılıkların %5,91 olduğu, daha fakir karışımlarda çevrimsel farklılıkların hızla artarak %10'un üzerine çıktığı tespit edilmiştir. Gerçekleştirilen diğer bir çalışmada enjeksiyon zamanlamasının RCCI yanması üzerine etkileri incelenmiştir (Uyumaz ve Solmaz, 2016). İzooktan ve n-heptan kullanılan çalışmada n-heptan direkt enjeksiyonla yedi farklı enjeksiyon zamanlaması kullanılarak silindire püskürtülmüştür. Maksimum indike termik verimin direkt enjeksiyonun ÜÖN'dan 80° önce gerçekleştirildiğinde %42,47 olarak elde edildiği belirlenmiştir.

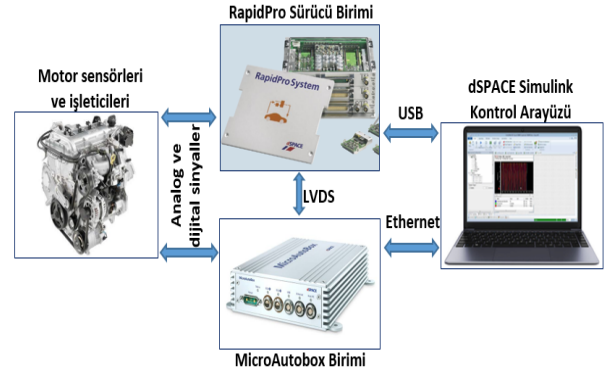
Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde çeşitli parametrelerin RCCI yanma karakteristikleri ve motor verimlerine etkilerinin incelendiği görülmektedir. Bu çalışmada emme havası giriş sıcaklığının RCCI yanması üzerindeki etkileri parametrik olarak incelenirken aynı zamanda özgül yakıt tüketimi haritaları çıkartılarak hem RCCI çalışma aralığının nasıl değiştiği hem de motorun RCCI modunda en verimli çalışma bölgeleri belirlenmiştir. Motoru RCCI modda optimum verimle çalıştırabilmek için direkt enjeksiyon püskürtme başlangıcı KA50 açısı dikkate alınarak her çalışma

noktası için değiştirilmiş ve böylece püskürtme avansı haritaları da elde edilebilmiştir.

DENEY DÜZENİ VE YÖNTEM

Deneyle dört silindri direkt enjeksiyon sistemine sahip bir GM Ecotec buji ile ateşlemeli motorunda referans yakıtlar izooktan ve n-heptan kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Deneyle motoruna ait teknik özellikler Tablo 1’de görülmektedir. Deneyle kullanılan referans yakıtların özellikleri ise daha önceki çalışmalarda verilmiştir (Arora, 2016; Halis ve ark., 2018; Calam ve İcingür, 2019c). Motorun RCCI modunda çalıştırılması için motorun emme manifolduna daha sonradan montajı gerçekleştirilen sekiz adet port tipi düşük basınç yakıt enjektöründen dört adedi kullanılmıştır. Port tipi yakıt enjektörlerinden düşük reaktiviteli izooktan yakıtı emme manifolduna püskürtülmüştür. Yüksek reaktiviteli yakıt n-heptan ise motorun orijinal donanımı olan direkt yakıt enjektörleri ile doğrudan silindir içerisine püskürtülmüştür. Port tipi yakıt enjeksiyonunda püskürtme basıncı 3 bar iken, direkt yakıt enjeksiyonu 100 bar basıncında gerçekleştirilmiştir. Deneyle motorunun RCCI modda çalıştırılması için motorun orijinal kontrol ünitesi devre dışı bırakılarak motor üzerindeki tüm işleticiler dSPACE markasına ait olan MicroAutobox mikroişlemci birimi ile RapidPro sürücü birimi kullanılarak kontrol edilmiştir.

Haberleşme ve motor kontrolünün şematik bir görünümü Şekil 1’de verilmiştir. Geliştirilen Simulink modeli ile motor üzerindeki işleticiler gerçek zamanlı olarak kontrol edilebilmektedir. MicroAutobox II Matlab/Simulink üzerinden programlanabilen 900 MHz hıza sahip, analog giriş ve çıkışları ile sensörlerden gelen bilgileri anlık toplayarak gerçek zamanlı kontrol yapmaya imkân sunan bir işlemci içermektedir. RapidPro ise kullanıcı arayüzünden gerçekleştirilen girdiler doğrultusunda MicroAutobox’ın hesaplayarak kendisine gönderdiği sinyaller doğrultusunda üzerinde bulunan sürücüler vasıtasıyla motor üzerindeki işleticileri çalıştırabilmektedir. Motor kontrolü için hazırlanan Simulink modeli işlemci üzerine gömülerek, dSPACE kontrol arayüzünden yakıt miktarı, ön karışım oranı (PR), gaz keleşi konumu, EGR valfi konumu, ateşleme sistemi, emme havası giriş sıcaklığı ve basıncı ile yüksek basınç pompası çıkış basıncı gibi motor yönetimine etki eden parametreler anlık olarak kontrol edilebilir hale getirilmiştir.



Şekil 1. Haberleşme ve motor kontrolünün şematik gösterimi

Tablo 1. Çalışma yapılan motorun teknik özellikleri

Model	GM Ecotec 2.0L GDI Turbo DOHC
Silindir Çapı x Strok [mm]	86 x 86
Silindir Sayısı	4
Silindir Hacmi [cc]	1998
Sıkıştırma Oranı [mm]	9,2:1
Maksimum Motor Gücü [kW @5300 d/d]	164
Maksimum Motor Torku [Nm @2400 d/d]	353
Emme Supapı Açılışı [°KA ÜÖNö]	25,5/-24,5
Emme Supapı Kapanması [°KA AÖNö]	2/-48
Egzoz Supapı Açılışı [°KA AÖNö]	36/-14
Egzoz Supapı Kapanması [°KA ÜÖNö]	22/-28

Tablo 1’de teknik özellikleri verilen deneyle motoru 460 HP gücünde AC bir dinamometreye bağlanmıştır ve motora ilk hareket dinamometre tarafından verilmiştir. Emme havası giriş sıcaklığı emme manifoldu ile gaz keleşi arasında konumlandırılan elektrikli bir ısıtıcı ile değiştirilmiştir. Bu ısıtıcının kontrolü dSPACE üzerinden yapılmıştır. Yakıt tüketimi hem PFI hem de DI enjektörlerin açık kalma sürelerine bağlı olarak püskürttüğü yakıt miktarları %0,1 doğrulukta ölçüm yapabilen coriolis tip Micro Motion 1700 yakıt debimetresi ile kütleli olarak ölçülmüştür. Elde edilen doğru denklemleri Simulink modeline gömülmüştür. Böylece kullanıcı ara yüzünden püskürtülmesi istenen yakıt miktarı ve istenen ön karışım oranı girildiğinde, enjektörlerin açık kalma süreleri MicroAutobox tarafından hesaplanmıştır. İlgili motorda yakıt miktarının ayarlanması ve enjektör kontrolü ile ilgili daha detaylı açıklama Halis ve ark. tarafından 2018 yılında yayımlanan bir çalışmada sunulmuştur (Halis ve ark., 2018).

Silindir içi basıncın ölçülmesinde 20,3 pC/bar hassasiyetindeki PCB marka I15A04 model basınç sensörü kullanılmıştır. Elde edilen basınç voltaj sinyali şarj amplifikatörü ile yükseltilerek yanma analiz sistemine 1°KA çözünürlükte bir enkoder kullanılarak kaydedilmiştir. Egzoz gaz sıcaklıkları egzoz manifoldu

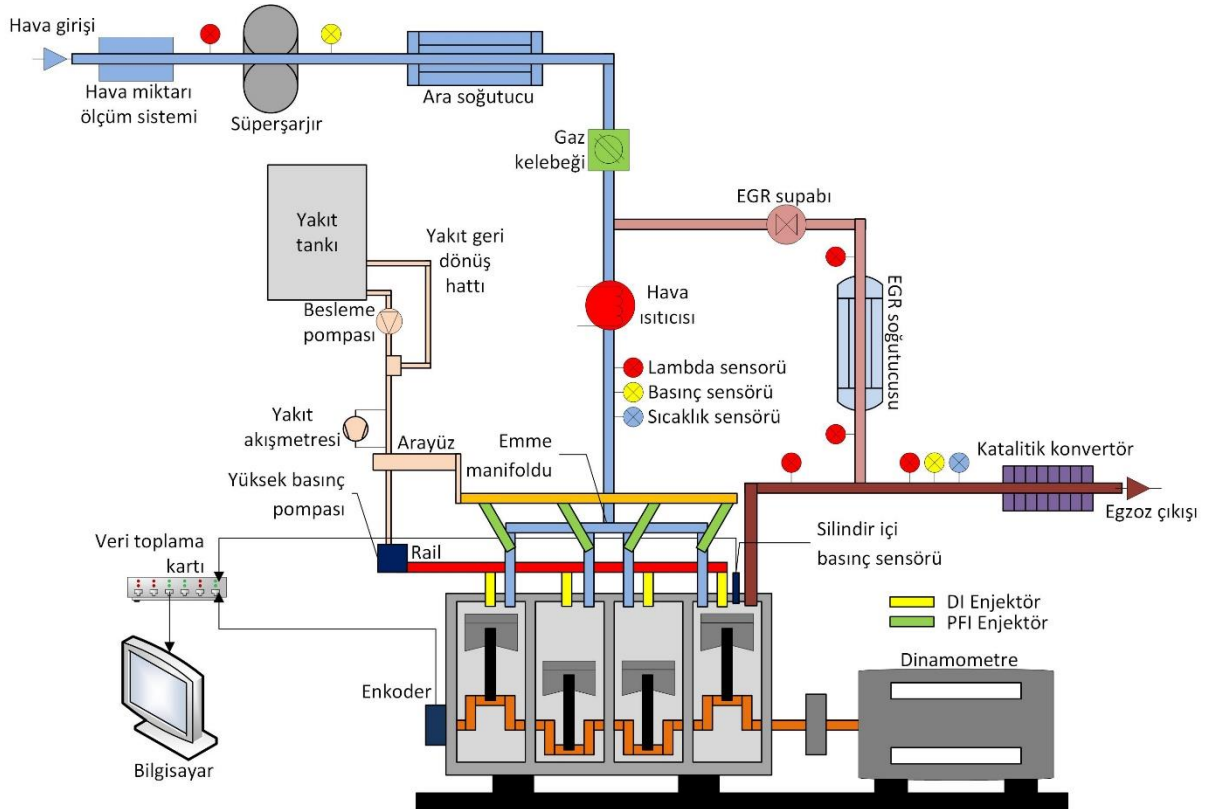
üzerinde egzoz valfinden yaklaşık 5 cm uzakta kalacak şekilde yerleştirilen K tipi termokupullarla ölçülmüştür. Lambda değerinin ölçümünde BOSCH LSU 4.9 geniş bantlı lambda sensörü kullanılmıştır.

Deneyle 40, 60, 80 ve 100 °C olmak üzere dört farklı emme havası giriş sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Deneysel yakıt olarak izooktan ve nheptan referans yakıtları kullanılmıştır. Düşük reaktiviteye sahip izooktan port yakıt enjeksiyon sisteminden, yüksek reaktiviteli nheptan ise direkt enjeksiyon sisteminden püskürtülmüştür. Ön karışım oranı tüm deneylede %20 (PR20) olarak sabit tutulmuştur. Bu oran silindire sürülen enerjinin %20 sinin porttan geri kalan kısmının da direkt enjeksiyonla silindire gönderildiğini ifade etmektedir. Deneysel düzeneğinin şematik görünümü Şekil 2’de verilmiştir. Deneyle her giriş sıcaklığında da 800 rpm motor hızından başlanılmış ve motorun tekleme yapmadan çıkabildiği maksimum motor devrine kadar veri toplanarak her giriş sıcaklığı için çalışma haritaları elde edilmiştir. Yüke ve motor hızına bağlı haritaların elde edilebilmesi için hem motor hızının hem de motor yükünün değiştirilmesi gerekmektedir. Bu çalışma kapsamında RCCI yanma modunun doğası gereği motor yükü silindire gönderilen yakıt miktarı ile değiştirilmiştir. Bu amaçla her motor devri için, motorun tekleme yapmadan çalışabildiği ve müsaade edilen vuruşu sınırı aralığında kalan yük bölgesi lambdanın değiştirilmesi suretiyle taranmıştır. Belirli bir motor devrinde lambda motor vuruşu sınırına gelene kadar

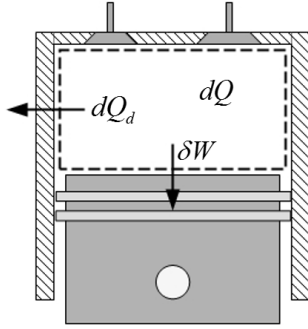
azaltılarak deneyle başlanılmıştır. Lambda değeri kademeli bir şekilde artırılarak bir motor devri için motor tekleme sınırına gelene kadar yaklaşık 4-5 farklı lambda değerinde veri kaydedilmiştir.

Düşük sıcaklık yanma çevrimlerinde yanma başlangıcı, yanma hızı ve süresi kimyasal kinetiklere, motorun sıkıştırma oranına, içeride bırakılan art gaz miktarına ve giriş havası sıcaklığına doğrudan bağlıdır. Bu çalışma kapsamında kullanılan motor buji ile ateşlemeli direkt enjeksiyonlu bir motor olduğundan sıkıştırma oranı 9,2 gibi yakıtın kendi kendine tutuşmasına çok da imkan vermeyecek bir değerdir. RCCI yanma modunda yakıtın kendi kendine tutuşması beklenildiğinden düşük sıkıştırma oranını telafi edecek bazı önlemler alınması gerekmektedir. Bu çalışma kapsamında yakıtın kendi kendine tutuşmasını sağlayabilmek amacıyla emme havasının ısıtılmasına ilave olarak, tüm test şartlarında egzoz supabı üst ölü noktadan 22 derece daha önce kapatılarak silindir içerisinde yüksek sıcaklıkta art gaz kalması sağlanmıştır.

Silindir içi ısı dağılımı termodinamiğin kapalı sistemler için verilen birinci kanunundan yararlanılarak hesaplanmıştır. Şekil 3’te yanma odasına çizilen kapalı sistem sınırları ve bu sınırlar boyunca gerçekleşen iş ve ısı geçişleri görülmektedir.



Şekil 2. Deneysel düzeneğinin şematik gösterimi



Şekil 3. Yanma odası kapalı sistemi

Supaplar ve segmanlardan meydana gelen kütle kaçakları ihmal edildiğinde sistem kapalı sistem olarak ele alınabilir. Bu durumda sistemde yanma sonucu bir miktar ısı açığa çıkmakta, silindir duvarlarından soğutma suyuna bir miktar ısı geçişi olmaktadır ve sistem piston üzerinde sınır işi gerçekleştirmektedir. Termodinamiğin birinci yasasının kapalı sistemler için verilen şeklinden,

$$dQ - \delta W - dQ_d = dU \quad (1)$$

elde edilir. Burada dQ ve dQ_d sırasıyla yakıtın yanması sonucu açığa çıkan ısı miktarını ve silindir duvarlarından transfer edilen ısı miktarını ifade etmektedir. İç enerji ve iş terimleri yerine yazılıp eşitlik tekrar düzenlendiğinde,

$$dQ = mc_v dT + pdV + dQ_d \quad (2)$$

olarak yazılabilir. İdeal gaz kanununun türevinden,

$$dT = \frac{1}{mR} Vdp + \frac{1}{mR} pdV \quad (3)$$

elde edilir. Son ifade eşitlik 2’de yerine yazılarak,

$$dQ = mc_v \left(\frac{1}{mR} Vdp + \frac{1}{mR} pdV \right) + pdV + dQ_d \quad (4)$$

elde edilir. Bu eşitlik tekrar düzenlendiğinde,

$$dQ = \frac{c_v}{c_p - c_v} Vdp + \left(1 + \frac{c_v}{c_p - c_v} \right) pdV + dQ_d \quad (5)$$

bulunur. Son eşitlikte özgül ısıların oranı, politropik üs n_c kullanılarak,

$$dQ = \frac{n_c}{n_c - 1} PdV + \frac{1}{n_c - 1} VdP + dQ_d \quad (6)$$

belirlenir. Son eşitlik yanma odasında yakıtın yanması sonucu açığa çıkan ısı miktarının hesabında kullanılmaktadır. Açığa çıkan ısı miktarını krank açısı başına hesaplayabilmek için eşitlik,

$$\frac{dQ}{d\theta} = \frac{n_c}{n_c - 1} P \frac{dV}{d\theta} + \frac{1}{n_c - 1} V \frac{dP}{d\theta} + \frac{dQ_d}{d\theta} \quad (7)$$

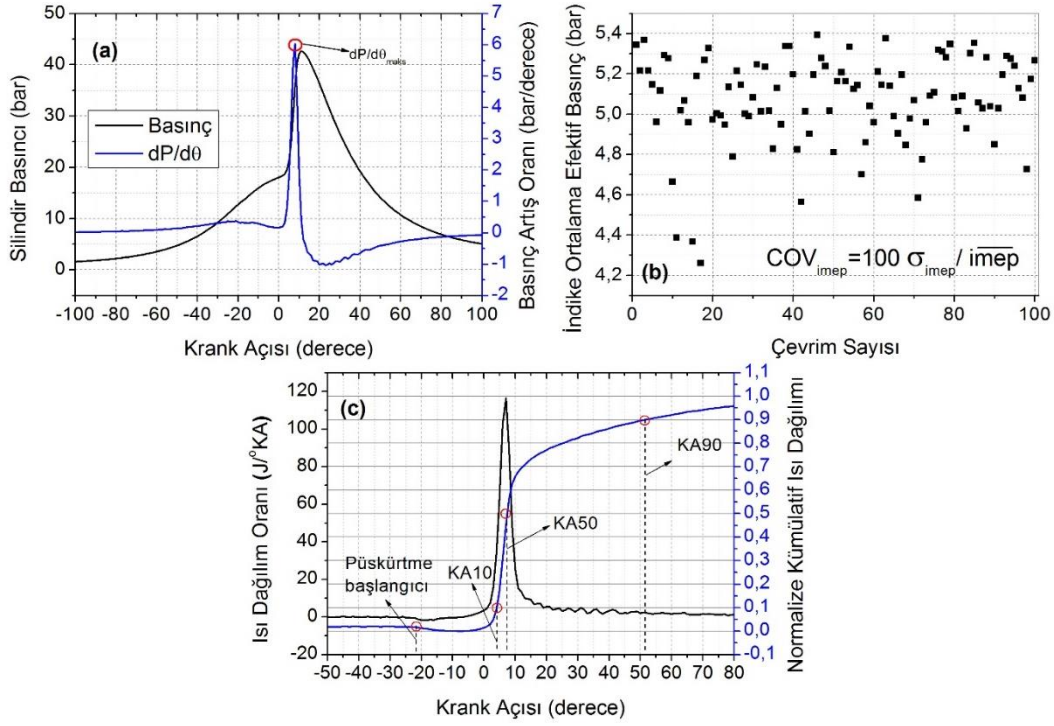
şeklinde düzenlenebilir. Son eşitlik silindir içerisindeki ısı dağılım oranının hesabında kullanılmaktadır. Eşitlikte $\frac{dQ}{d\theta}$ net ısı dağılımı oranını, $\frac{dQ_d}{d\theta}$ ise silindir duvarından transfer edilen ısıyı ifade etmektedir. Silindir duvarından transfer edilen ısı miktarı,

$$\frac{dQ_d}{d\theta} = \frac{1}{6n} h_g A (T_g - T_d) \quad (8)$$

eşitliği kullanılarak hesaplanmıştır. Son eşitlikte yer alan ısı taşınım katsayısı h_g modifiye edilmiş Woschni eşitliği ile hesaplanmıştır (Chang ve ark., 2004).

Deneyel ölçümlerdeki belirsizliklerin tanımlanabilmesi için deneysel veriler üzerinde hata analizi gerçekleştirilmiştir. Hata analizi için kareleri toplamının karekökü metodu kullanılmıştır (Taylor ve Kuyatt, 1994). Ölçülen ve hesaplanan bazı değerlerle ilgili belirsizlik aralıkları Tablo 2’de görülmektedir.

Düşük sıcaklık yanma çevrimlerinin tamamında olduğu gibi, RCCI yanma moduyla çalışan bir içten yanmalı motorun çalışma aralığı vuruntu ve tekleme bölgeleriyle sınırlandırılmaktadır. Yüksek vuruntu motor parçalarında aşırı ısıl gerilmeler ile mekanik arızalara sebep olurken, tekleme motorun düzenli çalışma ve düzenli güç çıkışı verebilme yeteneğini azaltmaktadır ve bazı durumlarda motorun stop etmesine de neden olabilir. Silindir basıncında derece başına 8-10 barlık bir artış oranı aşırı vuruntu olarak tanımlanmakta ve içten yanmalı motorların bu seviyede bir vuruntudan zarar göreceği belirtilmektedir. Şekil 4 (a)’da gösterildiği gibi silindir basıncının türevinin alınmasıyla basınç artış oranı belirlenebilir. Bu eğrinin maksimum değeri ilgili çevrimdeki maksimum basınç artış oranını (MPRR) vermektedir. Deneylerde tekleme ise indike ortalama basınç değerlerinin (IMEP) ardışık yüz çevrimdeki değişimleri dikkate alınarak belirlenmiştir. Şekil 4 (b)’de ardışık yüz çevrimdeki IMEP değerleri görülmektedir. Bu değerler kullanılarak hesaplanan standart sapmanın ortalama IMEP değerine oranlanmasıyla bulunan varyans katsayısının (COVimep) %10’u aşması durumunda motorda aşırı tekleme ve stop etme durumları meydana gelmektedir (Çınar ve ark., 2016; Heywood, 1988; Yılmaz, 2019). Silindire sürülen toplam enerjinin %10 ve %90’ının açığa çıktığı krank açıları sırasıyla yanma başlangıcı (KA10) ve yanma sonu (KA90) olarak tanımlanmaktadır. Bu iki krank açısının farkı ise krank açısı cinsinden yanma süresini ifade etmektedir. Yanma fazı olarak da ifade edilen, silindire sürülen yakıtın yarısının yandığı krank açısı KA50 şeklinde tanımlanmakta ve motor verimi üzerinde önemli bir etkisi bulunmaktadır (Solmaz, 2015; Yılmaz, 2019; Calam, 2020c). Silindir için yanma açısından önemli bilgiler ihtiva eden bu değerler Şekil 4 (c)’de görülen kümülatif ısı dağılımının normalize edilmesiyle elde edilen eğri üzerinden kolaylıkla belirlenebilmektedir.



Şekil 4. Bazı yanma parametrelerinin belirlenmesine yönelik örnekler

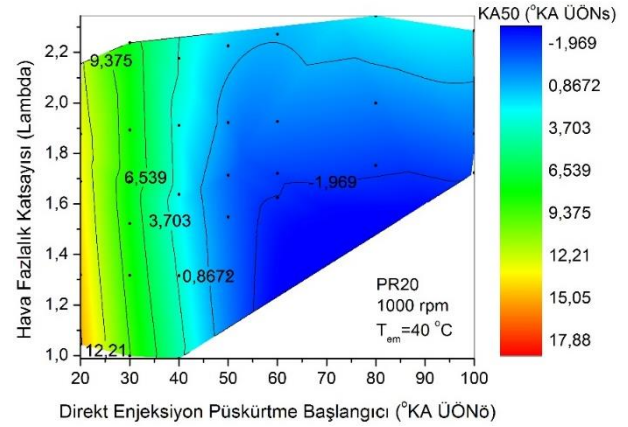
Tablo 2. Ölçülen ve hesaplanan değerlerdeki belirsizlikler

Parametre	Ölçüm aralığı		Belirsizlik aralığı (±)	
	Min.	Maks.	Min.	Maks.
Lambda [-]	1,0	3,96	0,01	0,04
Isı dağılım oranı [Joule/°KA]	-1,61	84,03	0,05	1,88
KA50 [°KA]	-10	20	1	1
Yanma süresi [°KA]	8	29	1	1
IMEP [kPa]	259,3	798,1	3,4	6,8
Motor torku [Nm]	24,8	71,2	0,2	0,7
ÖYT [g/kWh]	232,2	365,2	2,7	5,8
COVIMEP [%]	1,21	9,42	0,01	0,09
MPRR [kPa/CAD]	84,9	1609,4	1,9	36,1

DENEY SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRME

Çalışma kapsamında RCCI bir motorda farklı emme havası giriş sıcaklıkları için motorun çalışabildiği tüm devir ve yük şartlarında maksimum verimi sağlayabilmesi için direkt enjeksiyon püskürtme başlangıcının optimize edilmesi hedeflenmiştir. Motor verimliliği ile yanma fazı arasında doğrudan bir ilişki bulunmakta ve RCCI modunda yanma fazı direkt enjeksiyon püskürtme başlangıcıyla değişim göstermektedir. Bu nedenle sonuç ve değerlendirme bölümünde ilk olarak sabit bir motor devrinde ve emme havası giriş sıcaklığında farklı hava fazlalık katsayıları için direkt enjeksiyon püskürtme başlangıcı ile KA50 arasındaki ilişki açıklanmıştır. Daha sonra motorun farklı sıcaklıkları için yük ve hız bakımından çalışma aralıkları sunulmuş ve optimize edilmiş KA50 değerleri için motorun direkt enjeksiyon püskürtme avansı haritası sunulmuştur. Son bölümde ise optimum püskürtme avansı

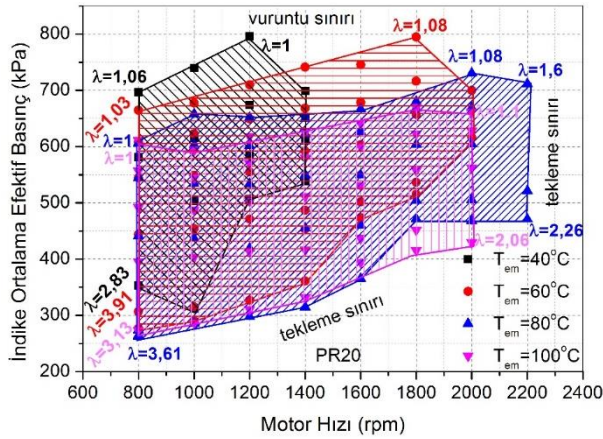
değerleri kullanılarak elde edilen özgül yakıt tüketimi haritalarına yer verilmiştir.



Şekil 5. Direkt enjeksiyon zamanlamasının yanma fazı üzerindeki etkisi

Daha önce belirtildiği üzere HCCI yanma modunun en büyük handikaplarından birisi yanma fazının kontrol edilememesidir. Bu nedenle motorda ya aşırı vuruntu ya da tekleme problemi görülmektedir. Her iki durumda da motorun termik verimi önemli ölçüde azalmaktadır. İçten yanmalı motorlardan maksimum termik verimin alınabilmesi için KA50 değerinin ÜÖNs 7-10 °KA aralığında olması gerekmektedir (Heywood, 1988). Bu soruna bir çözüm olabilmesi amacıyla geliştirilen RCCI yanma modunda silindir içerisine direkt olarak püskürtülen yüksek reaktiviteli yakıtın püskürtme zamanlaması yanma fazını daha kontrol edilebilir hale getirmektedir. Şekil 5'te 1000 rpm motor hızı ve 40 °C emme havası giriş sıcaklığında, PR20 için KA50 değerinin direkt enjeksiyon püskürtme açısına ve hava

fazlalık katsayısına bağlı değişimini göstermektedir. Şekil 5 incelendiğinde KA50 açısının püskürtme açısına bağlı olarak büyük ölçüde değiştiği ancak hava fazlalık katsayısı değişiminden çok fazla etkilenmediği görülmektedir. Grafikte görüldüğü üzere, belirtilen test şartları için en uygun püskürtme açısının ÜÖN'den 25-35 derece önce aralığındadır. Ancak buradan anlaşılacağı gibi, her farklı giriş havası sıcaklığı, ön karışım oranı ve motor hızı için uygun püskürtme açısı da değişecektir. Bu durumda farklı test şartları için direkt enjeksiyon püskürtme zamanlamasının sabit tutulması gerçek motor performansının görülebilmesine neden olacaktır. Ancak optimum motor performansını belirlemek için her test şartında farklı püskürtme açıları için data toplanıp bunların işlenerek en uygunlarının belirlenmesi ise çok fazla iş yükü anlamına gelmektedir. Bu ikilemi ortadan kaldırabilmek için, bu çalışmada KA50 değerine göre bir veri toplama sistemi geliştirilmiştir. Deneyler sırasında kullanılan basınç ölçüm sistemi KA50 değerini gerçek zamanlı olarak kullanıcı ara yüzüne aktarabilmektedir. Bir test sırasında ön karışım oranı, motor hızı, giriş sıcaklığı ve lambda belirlendikten sonra en uygun veri için KA50 değeri ÜÖN's 7-10 °KA aralığına denk gelecek şekilde püskürtme açısı değiştirilerek tüm veriler alınmıştır. Bu sayede çalışma neticesinde motora ait uygun püskürtme açısı haritası elde edilmiştir.



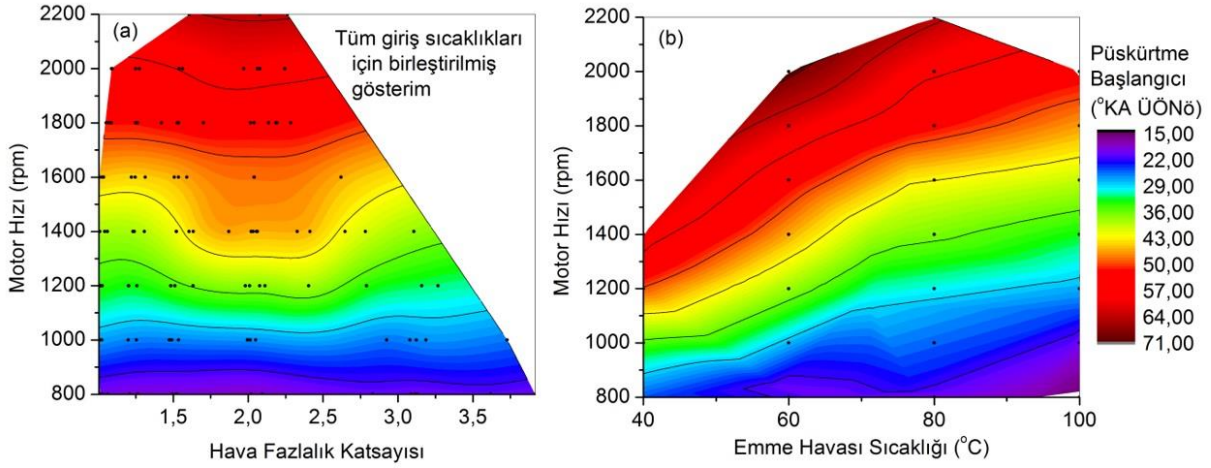
Şekil 6. Emme havası sıcaklığının RCCI motorun çalışma aralığına etkisi

Düşük sıcaklık yanma çevrimlerinde motorun çalışma aralığı vuruntu ve tekleme limitleri ile sınırlandırılmaktadır. Düşük yüklerde silindire sürülen yakıt miktarı azaldığından ortalama çevrim sıcaklığı oldukça düşmektedir. Bu durumda art gazların ve silindir duvarlarının da sıcaklığı giderek azalır. Bu nedenle takip eden çevrimlerde yakıtın kendi kendine tutuşması zorlaşmakta ve teklemeler görülmektedir. Motor yükünün artırılabilmesi için sıkıştırma ile ateşlemeli motorlarda olduğu gibi silindire gönderilen yakıt miktarı artırılır. Lambda giderek azalırken motor yükü ve aynı zamanda vuruntu miktarı da artar. Silindirde gerçekleşen eş zamanlı yanma sonucu ısı dağılım oranının çok yüksek değerlere ulaşması silindir içerisinde ani bir basınç yükselmesine ve dolayısıyla vuruntuya neden olur. Şekil 6'da farklı emme havası sıcaklıklarının RCCI motorun

çalışma aralığına etkisi görülmektedir. Deneylerde ön karışım oranı ve giriş sıcaklığı sabitlendikten sonra motor hızı 800 rpm'den itibaren 200 rpm aralıklarla artırılmıştır. Her devirde yakıt miktarı tekleme sınırından itibaren vuruntu sınırına kadar artırılarak motorun hem yük hem de devir aralığı belirlenmiştir. Görüldüğü üzere emme havası sıcaklığı fark etmeksizin bütün çalışma aralıklarında düşük yüklerde lambda yüksek değerler alınırken, motor yükü arttıkça lambda azalmıştır. Tüm giriş havası sıcaklıklarında lambda 1 civarında vuruntu şiddeti arttığından motor yükü daha fazla artırılmamıştır. En küçük çalışma aralığı 40°C giriş sıcaklığında görülmektedir. Düşük sıcaklıklarda fakir karışımların kendi kendine tutuşabilmesi zorlaşmakta ve çalışma aralığı sınırlı kalmaktadır. Giriş sıcaklığı arttıkça motor devrinin artırılabilirdiği görülmektedir. 80 °C giriş havası sıcaklığında motor devri 2200 rpm'e kadar çıkmaktadır ancak 100 °C giriş sıcaklığında maksimum motor devri 2000 rpm'de kalmaktadır. Sıcaklık artışı yakıtın kendi kendine tutuşabilmesine yardım etmekte ancak aynı zamanda motorda volümetrik verimin de azalmasına neden olmaktadır. 100 °C'de motor hızının azalmasının nedeni volümetrik verimin iyice azalmasıdır. Bu nedenle giriş havası sıcaklığının PR20 kullanıldığında maksimum 80 °C'ye kadar çıkarılması uygun olacaktır.

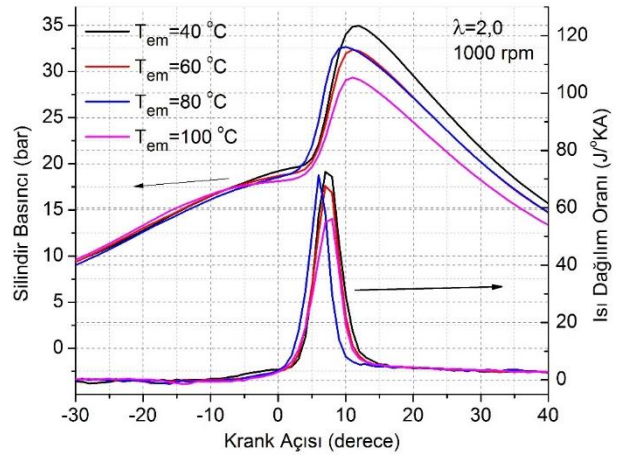
Şekil 7'de motor hızı, hava fazlalık katsayısı ve emme havası sıcaklığı değişkenlerine bağlı olarak KA50 açısını ÜÖN's 7-10 krank açısı derecesi aralığında tutabilmek için gerekli olan püskürtme açısı haritaları görülmektedir. KA50'yi istenilen aralıkta tutabilmek için motor hızı arttıkça püskürtme avansının da artırılması gerektiği Şekil 7 (a)'da görülmektedir. Motor hızı arttıkça fiziksel olarak yanma süresi çok fazla etkilenmemesine rağmen, krank birim zamanda daha fazla yol aldığından yanma süresi krank açısı cinsinden uzamaktadır. Bu durumda KA50 açısını motor verimliliği açısından uygun noktalarda tutabilmek için püskürtme avansını arttırmak gerekmektedir.

Benzer bir yaklaşım hali hazırda konvansiyonel bir yanma modu olan dizel motorlarında da uygulanmaktadır. Şekil 7 (a)'da görüldüğü üzere hava fazlalık katsayısının yanma fazı üzerinde önemli bir etkisi bulunmamaktadır. Homojen dolgulu motorlar olan buji ile ateşlemeli motorlarda yanma alev cephesi şeklinde molekülden moleküle ilerleyerek devam etmektedir. Bu tip bir yanma şeklinde HC moleküllerinin yakın çevresinde oksijen molekülü bulamaması durumunda yanma HC molekülü silindir içerisindeki girdabın etkisi ile oksijen bulunan başka bir noktaya ilerleyene dek yavaşlayacaktır. Ancak RCCI yanma modunda yanma silindirin neredeyse tamamında eş zamanlı olarak başladığından karışımın fakir veya zengin olması yanma hızını çok fazla etkilememektedir. Dolayısıyla optimum KA50 açısı için direkt enjeksiyon püskürtme zamanlamasının hava fazlalık katsayısından bağımsız olduğu ifade edilebilir. Geri beslemeli bir kontrol algoritmasıyla bir motor kontrol ünitesi tasarımı yapılması durumunda bu bağımsızlık RCCI modu için yazılımın daha da kolaylaşmasına imkan sağlayacaktır.



Şekil 7. Optimum KA50 için püskürtme başlangıcının değişimi

Şekil 7 (b)'de ise farklı emme havası giriş sıcaklığı ve motor devrinde istenilen KA50'nin elde edilebilmesi için gerekli püskürtme başlangıcı açısı haritası görülmektedir. Şekil 7 (a)'da olduğu gibi, yanma kinetiğinin ve içten yanmalı motor doğasının bir gereği olarak motor devri arttıkça püskürtme başlangıcının daha erkene alınması gerektiği anlaşılmaktadır. Emme havası giriş sıcaklığı yanma kinetikleri bakımından önem arz eden bir parametredir. Emme sıcaklığının artması sıkıştırma sonu ve yanma sonu sıcaklıklarının ve dolayısıyla da egzoz gaz sıcaklıklarının artmasına neden olur. Giriş havası sıcaklığının artırılması yanmanın kendi kendine başlamasının istenildiği düşük sıcaklık yanma çevrimlerinde yanmanın özellikle daha fakir karışımlarda daha kolay başlatılabilmesine imkan sağlamaktadır. Homojen dolgulı motorlarda giriş sıcaklığı arttıkça yakıt kendi kendine tutuşma sıcaklığına daha kolay ulaşacağından, doğal olarak yanma başlangıcı da öne alınmış olacaktır. Bu durumda yanma fazının kontrolü zorlaşır ve motor verimli çalışma bölgesinden uzaklaşır. RCCI yanma modunda direkt enjeksiyon zamanlaması motorun istenilen verimli bölgede tutulabilmesine imkan sağlamaktadır. Örneğin 1200 rpm motor hızında KA50'yi ÜÖNs 7-10 derece krank açısı aralığında tutabilmek için ihtiyaç duyulan püskürtme avansı, 40 °C giriş sıcaklığı için 50 derece krank açısı iken, 60, 80 ve 100 °C için sırasıyla 43, 35 ve 29 derecedir. Giriş sıcaklığı arttıkça püskürtme avansının azaltılması gerektiği buradan görülmektedir. Ancak burada direkt enjeksiyon kontrolünün KA50 açısına göre geri beslemeli olarak gerçekleştirilmesi çok yüksek hızlı gerçek zamanlı ve yüksek maliyetli işlemciler gerektirmektedir. Bunun yerine şekilde görülen harita bir gömülü sistem üzerinden motor kontrolü için kullanılabilir. Bu nedenle bu çalışmada emme havası sıcaklığının veya direkt enjeksiyon zamanlamasının parametrik olarak RCCI yanması ve motor performansına etkisinin incelenmesinin yanında, kullanılabilir bir çıktıya dönüştürülebilmesi adına bu çalışma haritaları da sunulmuştur.

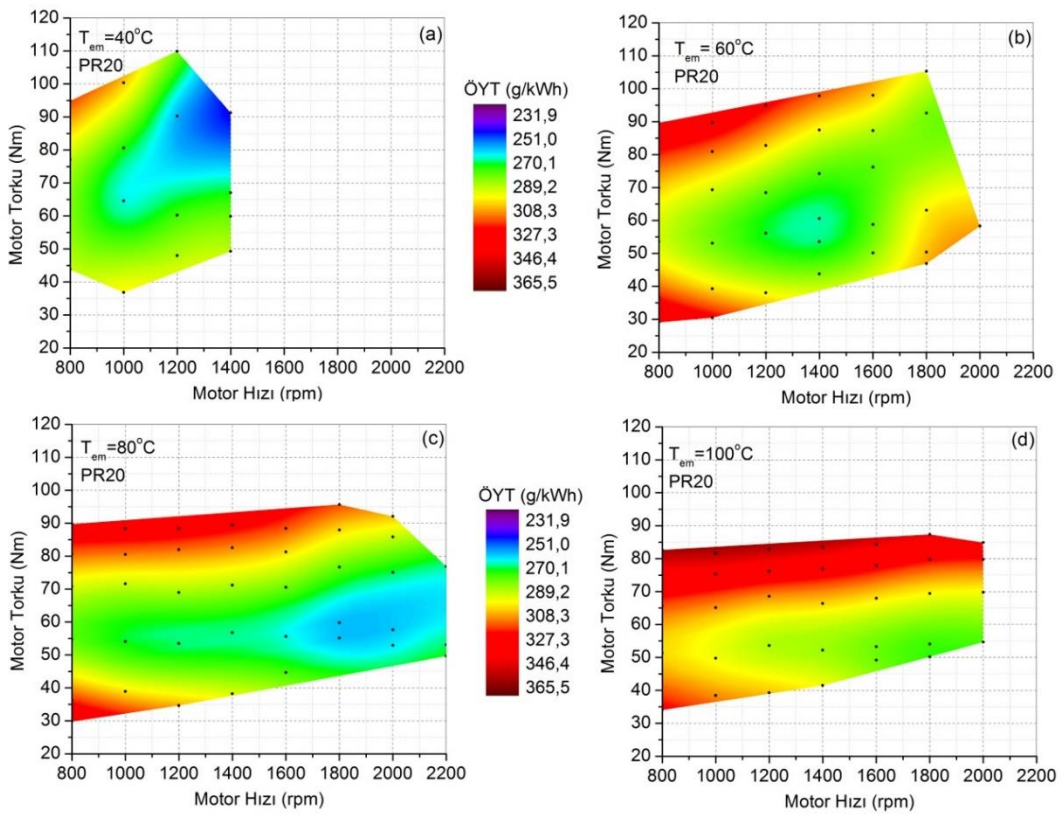


Şekil 8. Emme havası sıcaklığının RCCI motorun çalışma aralığına etkisi

Şekil 8 silindir basıncı ve ısı dağılım oranlarının farklı farklı giriş sıcaklıklarından nasıl etkilendiğini göstermektedir. Grafiğin elde edilmesinde kullanılan dotalar 1000 rpm motor hızında ve hava fazlalık katsayısının 2 olduğu şartlarda toplanmıştır. Şekilde görüldüğü üzere tüm giriş sıcaklıkları için yanma başlangıcı neredeyse aynıdır. Normal şartlarda parametrik olarak gerçekleştirilen bir çalışmada emme havası sıcaklığı arttıkça yanma başlangıcının ve yanma fazının daha erken krank açılarında meydana gelmesi beklenmektedir. Dolayısıyla bu durumda yanma fazı öne kaydırdığından, istenilen çalışma şartları için sanki tek bir sıcaklığın sağladığı yanılıgı ortaya çıkmaktadır. Şekil 8'de 40 °C, 60 °C ve 100 °C emme giriş sıcaklıkları için KA50 açısı ÜÖNs 7 °KA iken, 80 °C giriş sıcaklığı için ÜÖNs 6 derece krank açısı olarak gerçekleştiği tespit edilmiştir. Yanma fazının bu aralıkta tutulabilmesi için kullanılan direkt enjeksiyon püskürtme açıları 40, 60, 80 ve 100 °C için sırasıyla ÜÖNö 35, 37, 35 ve 20 derece krank açısıdır. KA50 açıları incelendiğinde, 80 °C de meydana gelen 1 derecelik fark kullanılan enkoder çözünürlüğünün 1 derece olmasından kaynaklanmaktadır. Enkoder çözünürlüğü kontrol hassasiyetini etkilemektedir. Dolayısıyla Şekil 7'de verilen haritalarda da ± 1 derecelik bir sapma görülebilir. Ancak yine de yanma fazının tüm giriş sıcaklıkları için

istenilen aralıkta tutulabildiği ifade edilebilir. Şekil 8’de dikkat çeken diğer bir nokta ise farklı giriş sıcaklıklarında ortaya çıkan maksimum silindir içi basınç değerleridir. Görüldüğü üzere maksimum basınç 40 °C emme havası sıcaklığında 35 bar olarak ölçülmüştür. En düşük pik basınç ise 100 °C giriş sıcaklığında 29 bar olarak elde edilmiştir. Daha önce gerçekleştirilen parametrik çalışmalarda, emme havası sıcaklığının etkisi incelenirken diğer tüm parametreler sabit tutulduğundan giriş sıcaklığı arttıkça vuruntu eğiliminin de artmasıyla maksimum silindir basınçlarının arttığı görülmüştür. Üstelik bu basınç artışı yüksek sıcaklık nedeniyle azalan volümetrik verime rağmen meydana gelmektedir. (Calam, 2019b). Ancak maksimum basınç artmasına rağmen termik verimin uygun olmayan yanma fazı ve artan vuruntu şiddeti nedeniyle azalması kaçınılmazdır.

Silindir sıcaklığının artmasından olumsuz yönde etkilenen volümetrik verim de termik verimin azalmasında rol oynamaktadır. Bu nedenle parametrik olarak inceleme yapıldığında motor performansını tam olarak değerlendirebilmek mümkün değildir. Şekil 8 için değerlendirme yapıldığında, maksimum indike termik verimin %40,32 olarak 40 °C giriş sıcaklığında elde edildiği belirlenmiştir. En düşük indike termik verim ise 100 °C giriş sıcaklığında %34,8 olarak hesaplanmıştır. Yanma fazları ve hava fazlalık katsayıları aynı olmasına rağmen, emme havası sıcaklığı arttıkça maksimum silindir basıncının ve indike termik verimin azalması, volümetrik verimin düşmesi ve artan gaz sıcaklıkları nedeniyle ısı kayıplarının fazlalaşmasından kaynaklanmaktadır.



Şekil 9. Farklı giriş sıcaklıkları için özgül yakıt tüketimi haritaları

Şekil 9’da dört farklı giriş sıcaklığı için optimum KA50 yaklaşımı kullanılarak elde edilen fren özgül yakıt tüketimi haritaları görülmektedir. Haritalar ayrıca motor hızı ve fren motor torku çalışma aralıklarını da ifade etmektedir. Grafiklerin eksen ve renkli kontur skalaları anlaşılabilir olması ve kıyaslamayı kolaylaştırabilmek amacıyla aynı aralıklarda seçilmiştir. Minimum özgül yakıt tüketimi 232,3 g/kWh olarak 40 °C giriş sıcaklığında elde edilirken, maksimum özgül yakıt tüketimi 100 °C giriş sıcaklığında 365,1 g/kWh olarak elde edilmiştir. Düşük giriş sıcaklığında volümetrik verimin daha iyi olması nedeniyle harita geneline bakıldığında daha düşük özgül yakıt tüketimi değerlerinin elde edildiği söylenilebilir. Yine volümetrik verimin etkisiyle maksimum motor torkunun 40 °C giriş sıcaklığı için diğer giriş sıcaklıklarına göre daha yüksek

olduğu sıcaklık arttıkça maksimum motor torkunda da bir azalma olduğu şekilden anlaşılmaktadır. 40 °C giriş sıcaklığı gerçek uygulama şartlarında egzoz gaz sıcaklığı ile kolayca temin edilebilir ve dolayısıyla ekstra bir enerji sarfiyatına gerek kalmaksızın emme havası ısıtılabilir. Ancak bu giriş sıcaklığı için çalışma aralığının şekilde görüldüğü üzere çok dar olması pratik motor uygulamaları için uygun değildir. Bu sıkıştırma oranı ve PR20 oranı için optimum emme havası giriş sıcaklığının 80 °C olduğu söylenilebilir. Bu giriş sıcaklığında motor 800-2200 rpm ile 30-90 Nm motor yükleri aralığında bir çalışma gerçekleştirebilmiş ve bu aralıkların geniş bir bölgesinde özgül yakıt tüketimi değeri 260-290 g/kWh aralığında kalmıştır. RCCI yanma modu için oldukça düşük bir sıkıştırma oranı olan 9,2 için elde edilen bu özgül yakıt tüketimi değerleri, yüksek sıkıştırma oranına

sahip bir dizel motorunun özgül yakıt tüketimi değerlerine yakındır. Dolayısıyla RCCI yanma modunun daha yüksek sıkıştırma oranlarında uygulanması durumunda, iyi bir KA50 kontrolü ile daha düşük yakıt tüketimi değerlerine ulaşılabilir.

SONUÇLAR

Bu çalışmada dört silindirli direkt enjeksiyonlu, sıkıştırma oranı 9,2 olan bir buji ile ateşlemeli motor RCCI modda çalıştırılarak motor çalışma aralığı ile farklı giriş sıcaklıklarının etkileri incelenmiştir. RCCI modda hem port enjeksiyonu hem de direkt enjeksiyon gerektiğinden, motor çalışma aralığı ve özgül yakıt tüketimi direkt enjeksiyon başlangıcından etkilenmektedir. Optimum püskürtme başlangıcının belirlenebilmesi için KA50 açısı dikkate alınarak püskürtme başlangıcı anlık olarak değiştirilmiş ve KA50 açısı 7-10 derece ÜÖNs aralığında tutulmaya çalışılmıştır. Yanma fazının kontrolü için püskürtme başlangıcı, hava fazlalık katsayısı ve emme havası giriş sıcaklığı parametrelerinin etkileri incelenmiş ve KA50 açısının hava fazlalık katsayısındaki değişimden çok etkilenmediği ancak püskürtme basıncı ve giriş sıcaklığına bağlı olarak önemli bir değişim gösterdiği belirlenmiştir. Püskürtme başlangıcı ve giriş sıcaklığına bağlı elde edilen KA50 haritası motor kontrol algoritması için bir giriş parametresi olarak kullanılabilir. Bu şartlarda gerçekleştirilen deneylerde en geniş çalışma aralığı 80 °C emme havası sıcaklığı için elde edilmiştir. Minimum özgül yakıt tüketimi ise volümetrik verimin daha iyi olmasından dolayı 40 °C’de elde edilmiştir. Giriş sıcaklığı arttıkça volümetrik verimin kötüleşmesine bağlı olarak özgül yakıt tüketiminin arttığı belirlenmiştir. Sıkıştırma oranı 9,2 gibi RCCI yanması için çok düşük bir değer olmasına rağmen iyi bir KA50 kontrolü ile minimum özgül yakıt tüketimi değeri yüksek sıkıştırma oranlı dizel motorlarına yakın olarak 232,3 g/kWh elde edilmiştir. Yüksek sıkıştırma oranlı bir motorda bu değer daha da aşağı çekilebilir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma, TUBITAK tarafından 2219/A doktora sonrası araştırma burs programı kapsamında desteklenmiştir. Deney düzeneğinin kurulumunda United States National Science Foundation (Grant No:1434273) tarafından sağlanan finansal destek kullanılmıştır. Yazarlar TUBITAK, United States National Science Foundation ve Michigan Teknoloji Üniversitesi Enerji Mekatroniği Laboratuvarı eski yöneticisi Dr. Mahdi Shahbakhti’ye teşekkür eder.

KAYNAKLAR

Ardebili S. M. S., 2020, Green electricity generation potential from biogas produced by anaerobic digestion of farm animal waste and agriculture residues in Iran. *Renewable Energy*.

Ardebili S. M. S. and Khademalrasoul, A., 2018, An analysis of liquid-biofuel production potential from

agricultural residues and animal fat (case study: Khuzestan Province), *Journal of cleaner production*, 204, 819-831.

Ardebili S. M. S., Taghipoor A., Solmaz H., and Mostafaei M., 2020, The effect of nano-biochar on the performance and emissions of a diesel engine fueled with fusel oil-diesel fuel, *Fuel*, 268, 117356.

Calam, A., 2020a, Study on the combustion characteristics of acetone/n-heptane blend and RON50 reference fuels in an HCCI engine at different compression ratios, *Fuel*, 271, 117646.

Calam A., Aydoğan B., and Halis S. 2020b, The comparison of combustion, engine performance and emission characteristics of ethanol, methanol, fusel oil, butanol, isopropanol and naphtha with n-heptane blends on HCCI engine, *Fuel*, 266, 117071.

Calam A., 2020c, Effects of the fusel oil usage in HCCI engine on combustion, performance and emission. *Fuel*, 116503.

Calam A., Solmaz H., Yılmaz E., and İçingür, Y., 2019a, Investigation of effect of compression ratio on combustion and exhaust emissions in A HCCI engine. *Energy*, 168, 1208-1216.

Calam A., and İçingür Y. 2019b, Giriş Havası Sıcaklığının Hccı Motorun Yanma Ve Performansına Etkileri. *Isi Bilimi ve Tekniği Dergisi/Journal of Thermal Science & Technology*, 39(1).

Calam A., and İçingür Y., 2019c, Hava fazlalık katsayısı ve oktan sayısı değişiminin HCCI yanma karakteristiklerine ve motor performansına etkileri. *Politeknik Dergisi*, 22(3), 607-618.

Celikten I., Karaaslan E., Solmaz H. and Polat S., 2015, Benzin Katkı Maddelerinin Motor Performansı ve Egzoz Emisyonlarına Etkilerinin Deneysel Olarak İncelenmesi, *Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi*, 35(1), 87-95.

Chang J., Guralp O., Filipi Z., Assanis D., Kuo T. W., Najt P. and Rask R., 2004, New Heat Transfer Correlation for an HCCI Engine Derived from Measurements of Instantaneous Surface Heat Flux, *SAE Technical Paper*, 2004-01-2996.

Çelik, M., Solmaz, H., Yücesu, H. S., and Yılmaz, E., 2016, Kanola Metil Esterine N-Heptan Katkısının Motor Performansı ve Yanma Karakteristiklerine Etkilerinin İncelenmesi, *Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi*, 36(1), 9-16.

Çınar C., Uyumaz A., Polat S., Yılmaz E., Can Ö. and 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.

- Haraldsson G., Tunestål P., Johansson B., Hyvönen J., 2002, HCCI combustion phasing in a multi cylinder engine using variable compression ratio, *SAE Technical Paper*, 2002-01-2858.
- Liu H., Yao M., Zhang B., and Zheng Z., 2008, Effects of inlet pressure and octane numbers on combustion and emissions of a homogeneous charge compression ignition (HCCI) engine, *Energy & Fuels*, 22(4), 2207-2215.
- Halis S., Nacak Ç., Solmaz H., Yılmaz E., and Yücesu H. S., 2018, HCCI bir motorda oktan sayısının yanma karakteristikleri ve motor performansı üzerine etkilerinin incelenmesi, *Isı bilimi ve tekniği dergisi/Journal of thermal science & technology*, 38(2).
- Hanson R., Kokjohn S., Splitter D., and Reitz R. D., 2011, Fuel effects on reactivity controlled compression ignition (RCCI) combustion at low load, *SAE International Journal of Engines*, 4(2011-01-0361), 394-411.
- Helmantel A., Denbratt I., 2004, HCCI operation of a passenger car common rail DI diesel engine with early injection of conventional diesel fuel., *SAE Technical Paper*, 2004-01-0935.
- Heywood J. B., 1988, Internal combustion engine fundamentals, McGraw-hill New York.
- Kocakulak T., and Solmaz H., 2019, Elektrikli Bir Aracın Modellenmesi ve Rejeneratif Fren Sisteminin Bulanık Mantık Yöntemi ile Kontrol Edilmesi. *Int. Symp. Automot. Sci. Technology*.
- Kokjohn, S., Hanson, R., Splitter, D., Kaddatz, J., and Reitz, R. D., 2011, Fuel reactivity controlled compression ignition (RCCI) combustion in light-and heavyduty engines. *SAE International Journal of Engines*, 4(2011-01-0357), 360-374.
- Kokjohn S.L., Hanson R.M., Splitter D.A., Reitz R.D. 2009, Experiments and modeling of dual-fuel HCCI and PCCI combustion using in-cylinder fuel blending. *SAE Paper*, 2009-01-2647.
- Christensen M., Johansson B., Hultqvist A., 2002, The effect of combustion chamber geometry on HCCI operation, *SAE Technical Paper*, 2002-01-0425.
- Iida M., Hayashi M., Foster D.E., Martin J.K., 2003, Characteristics of homogeneous charge compression ignition (HCCI) engine operation for variations in compression ratio, speed, and intake temperature while using n-butane as a fuel, *Journal of engineering for gas turbines and power*, 125 (2), 472-478.
- Sjöberg M., Edling L.O., Eliassen T., Magnusson L., and Ångström H. E., 2002, GDI HCCI: Effects of injection timing and air swirl on fuel stratification, combustion and emissions formation, *SAE Technical Paper*, 2002-01-0106.
- Polat S., Solmaz H., Yılmaz E., Calam A., Uyumaz A., and Yücesu H. S., 2020, Mapping of an HCCI engine using negative valve overlap strategy. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 42(9), 1140-1154.
- Reitz R.D., Hanson R.M., Splitter D.A., Kokjohn S.L., 2013, Engine combustion control via reactivity stratification, USA Patent No:8616177 B2.
- Onishi S., Jo S.H., Shoda K., Do Jo P., and Kato S., 1979, Active thermo-atmosphere combustion (ATAC)-a new combustion process for internal combustion engines, *SAE Technical paper*, 790501.
- Solmaz H., and Kocakulak T., 2018, Buji ile Ateşlemeli Motor Kullanılan Seri Hibrit Elektrikli Bir Aracın Modellenmesi. *In Proceedings on International Conference on Technology and Science*.
- Solmaz H., and Kocakulak, T., 2020, HCCI Menzil Artırıcı Motor Kullanılan Seri Hibrit Bir Aracın Modellenmesi, *GU J Sci, Part C*, 8(2):279-292, doi: 10.29109/gujsc.670564.
- Solmaz H., 2020, A comparative study on the usage of fusel oil and reference fuels in an HCCI engine at different compression ratios, *Fuel*, 273, 117775.
- Solmaz H., Yamık H., Uyumaz A., Polat S., and Yılmaz E., 2016, Direkt enjeksiyonlu bir dizel motorunda dizel ve jet-a1 yakıt karışımlarının yanma, motor performansı ve egzoz emisyonlarına etkileri üzerine deneysel bir çalışma, *Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi*, 36(2), 51-60.
- Splitter D., Hanson R., Kokjohn S., Wissink M., and Reitz R. D., 2011, Injection effects in low load RCCI dual-fuel combustion, *SAE Technical Paper*, 2011-24-0047
- Johansson T., Johansson B., Tunestål P., and Aulin H., 2009, HCCI operating range in a turbo-charged multi cylinder engine with VVT and spray-guided DI, *SAE World Congress & Exhibition*, , 1-13.
- Taylor B. N., and Kuyatt C. E., 1994, Guidelines for Evaluating and Expressing the Uncertainty of NIST Measurement Results, *NIST Tech Note*, 1297, 1-20. doi:10.6028/NIST.TN.1900
- Uyumaz A., Solmaz H., 2016. RCCI bir motorda enjeksiyon zamanlaması ve lamdanın yanma ve performans karakteristikleri üzerindeki etkilerinin deneysel incelenmesi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*, 4(4), 299-308.
- Uyumaz A., Solmaz H., Fahrettin B. O. Z., Yılmaz E., and Polat S., 2017, Reaktif Kontrollü Sıkıştırma İle Ateşlemeli (RCCI) Bir Motorda Lamdanın Yanma

Karakteristiklerine Etkileri, *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 17(3), 1146-1156.

Uyumaz A., Aydoğan B., Calam A., Aksoy F., and Yılmaz E., 2020, The effects of diisopropyl ether on combustion, performance, emissions and operating range in a HCCI engine, *Fuel*, 265, 116919.

Yılmaz E., 2019, Investigation of the effects of diesel-fusel oil fuel blends on combustion, engine performance and exhaust emissions in a single cylinder compression ignition engine, *Fuel*, 255, 115741.