



BİYOGAZ YAKITLI REAKTİVİTE KONTROLLÜ SIKIŞTIRMA ATEŞLEMELİ BİR MOTORUN NSGA-II ALGORİTMASIYLA OPTİMİZASYONU

Tülay ÇELİK¹, Ramazan ŞENER^{2*}

¹ Batman Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Yenilenebilir Enerji Sist. Bölümü,
Batman, ORCID No : <http://orcid.org/0000-0003-3530-9991>

² Bandırma Onyedü Eylül Üniversitesi, Denizcilik Fakültesi, Gemi Makineleri İşletme Mü-
hendisliği Bölümü, Bandırma/Balıkesir
ORCID No : <https://orcid.org/0000-0001-6108-8673>

Anahtar kelimeler

Öz

*Biyogaz, reaktivite
kontrollü sıkıştırma
ateşlemeli, sanki-
boyutlu, optimizasyon*

Reaktivite kontrollü sıkıştırma ateşlemeli (RCCI) motorlar, yüksek verime ve düşük emisyon değerlerine sahip olan yenilikçi bir yöntemdir. RCCI motorlarda, diğer içten yanmalı motorlardan farklı olarak hem emme hattına hem de silindir içine enjekte edilen farklı reaktivite dereceli yakıtlarla yanma kontrol altına alınabilmektedir. Bu çalışmada, yenilenebilir bir kaynak olarak biyogazın, RCCI bir motorda yakıt olarak kullanılma potansiyeli araştırılmıştır. Düşük reaktiviteli yakıt olarak emme hattına biyogaz enjeksiyonunun etkileri değerlendirilmiştir. Biyogaz yakıtlı bir RCCI motorun deneysel olarak doğrulanmış sanki-boyutlu modellenmesi gerçekleştirilmiştir. Test motoru, farklı çalışma parametreleri için, biyogaz kullanıma uygunluğu araştırılmış ve optimum parametreler belirlenmiştir. Biyogazın lambda sayısı, motor devri, sıkıştırma oranı, emme basıncı ve supap zamanlamalarına göre yanma ve motor performansına etkileri incelenmiştir. Yapılan çalışmalar sonucunda, sanki-boyutlu motor modeli ve NSGA-II yöntemi kullanılarak optimum değerler tespit edilmiştir. Elde edilen değerlerle RCCI motor, minimum özgül yakıt tüketimi (ÖYT) ve maksimum verim ile çalışabileceği belirlenmiştir.

* rsener@bandirma.edu.tr
doi : 10.46399/muhendismakina.1244334

OPTIMIZATION OF A BIOGAS FUELED REACTIVITY CONTROLLED COMPRESSION IGNITION ENGINE USING NSGA-II ALGORITHM

Keywords

Biogas, reactivity controlled compression ignition, quasi-dimensional, optimization

Abstract

Reactivity-controlled compression ignition (RCCI) engine is an innovative method with high efficiency and low emissions. In the RCCI engine, unlike other types of internal combustion engine (ICE), the combustion can be controlled with fuels of different reactivity degrees injected both into the intake and into the cylinder. In this study, the potential of biogas as a renewable resource to be used as a fuel in an RCCI engine was investigated. The effects of biogas injection into the intake as a low-reactivity fuel were evaluated. An experimentally validated quasi-dimensional modeling of a biogas-fueled RCCI engine has been carried out. The test engine fueled with biogas was investigated for different operating parameters, thus, the optimal parameters were determined. The influence of biogas on combustion and engine performance characteristics according to lambda, engine speed, compression ratio, intake pressure, and valve timings were investigated. As a result of the studies, optimum values were determined using the quasi-dimensional (QD) engine model and NSGA-II method. With these optimum values, it has been determined that the RCCI engine can operate with minimum specific fuel consumption (SFC) and maximum efficiency.

Araştırma Makalesi

Başvuru Tarihi : 30.01.2023

Kabul Tarihi : 04.09.2023

Research Article

Submission Date : 30.01.2023

Accepted Date : 04.09.2023

Extended Abstract

Introduction

Biogas is a promising renewable energy source obtained from biomass via anaerobic digestion. Biogas is a final product resulting from the decomposition of organic wastes under the influence of appropriate microorganisms in an anaerobic (oxygen-free) environment. Biogas consists of methane (60-70%) and carbon dioxide (30-40%), besides, a low amount of water vapor and hydrogen sulfide. Biogas can be a good alternative fuel for internal combustion engines. Especially, biogas can be used as low reactivity fuel in reactivity-controlled compression ignition (RCCI) engine. RCCI is an innovative method, which utilizes two different reactivity fuels in the combustion system. In RCCI strategy, the combustion is controlled with two fuels with different reactivities injected into the intake port and into the cylinder. RCCI emits ultra-low NO_x and soot emissions with a very high efficiency.

Objectives/ Research Purpose

In this study, the effects of the biogas injection, which is a renewable resource, as a low-reactivity fuel into the intake port were evaluated on combustion and performance characteristics of RCCI. Using the experimental validated quasi-dimensional (QD) model, the engine operating parameters were optimized by the non-dominated sorting genetic algorithm (NSGA-II) algorithm. Hundreds of different combinations, which would not be possible with experimental work and would take a lot of time, were simulated, and the most optimal operating parameters were determined among the results. The potential of biogas usage as a renewable resource was evaluated in RCCI engine.

Materials and Method

Caterpillar® 3401 single-cylinder compression-ignition engine was used as test engine. The engine works with different reactivity fuels, using both direct injection (diesel) and port injection (biogas). The test engine is modeled using GT-Suite commercial code with all its parameters including the valves, injectors and cylinder. Optimization work was carried out with a QD model of the test engine. The genetic algorithm method is one of the best methods for solving problems that have medium and high complexity, have multiple independent variables. NSGA-II method was used in the optimization.

Results and Discussions

The biogas fueled reactivity-controlled compression ignition engine is modeled and validated with the experimental results. The influence of lambda, engine speed, compression ratio, intake pressure, and valve timings on combustion and engine performance of RCCI engine were evaluated with QD model. The intake and exhaust timings were optimized using the NSGA-II method according to the characteristics of the biogas fueled RCCI engine. The engine power and torque increased by 15.1%. While the BSFC decreased by 11.3%, the brake efficiency increased by 12.7%.

Conclusions

The test engine produces the maximum power and torque with a compression ratio of 17. On the other hand, the maximum efficiency was obtained with intake pressure of 2.6 bar. However, at this value, the maximum in-cylinder pressure increases considerably. The minimum brake specific fuel consumption (BSFC) was obtained with the lambda of the biogas is around 4. For engine speed, the maximum power with minimum BSFC was produced with speed of 1500 rpm. The higher the methane content in the biogas composition results the higher the engine power. According to the parametric and optimization studies, the optimal operating parameters were determined for biogas fueled RCCI engine in this study.

1. Giriş

Dünyada enerjiye duyulan ihtiyaç giderek artmaktadır (Aghahosseini ve diğ., 2023). Bunun nedenleri arasında teknolojik gelişmeler, nüfus artışı, sanayileşme ve insanların yaşam konforu beklentisinin yükselmesi bulunmaktadır. Enerji öncelikli bir konudur ve genellikle fosil kaynaklar kullanılarak ihtiyaç karşılanır (Wang, Fan ve Zhou, 2022). Fosil kaynakların başında kömür, petrol ve doğalgaz gelmektedir. Piyasa da bulunan birçok sistem fosil yakıtlar ile çalışacak şekilde tasarlanmıştır (Karaca, 2017). Çevresel sorunların birçoğu da fosil kaynakların tüketimi nedeniyle ortaya çıkmaktadır. Bu nedenle, bilim insanları alternatif enerji kaynaklarına yönelmişlerdir (Alptekin, Şanlı ve Çanakçı, 2022; Atılğan ve Yılmaz, 2021). Ayrıca, içten yanmalı motorların emisyonlarını azaltmaya yönelik birçok çalışma yapılmıştır (Savcı, Şener ve Duman, 2022; Şener, 2022).

Küresel enerji talebine karşı artış ve çevrenin korunmasına karşı artan endişeler, bilim adamlarını güneş enerjisi, rüzgâr enerjisi, biyogaz vb. gibi yenilenebilir enerji kaynaklarına yönlendirmiştir (Koç ve Kaya, 2015). Fosil yakıtlara alternatif olarak biyogaz, alkoller ve biyodizel gibi yakıtlar da gösterilebilir. Motorlu taşıtlarda kullanılan fosil yakıtların çevreye verdikleri zararlı emisyonları azaltmak için farklı yakıt türlerine yönelim başlamıştır. Özellikle fosil yakıt yanmasından dolayı salınan karbondioksit, azotoksitler ve kükürt dioksit gibi çevreye zararlı bileşenleri ortadan kaldırmak için daha temiz enerji kaynakları tercih edilmektedir. Yenilenebilir enerji kaynakları net karbondioksit emisyonlarını azaltma konusundaki doğal potansiyelleri sayesinde araştırmacıların dikkatini çekmektedir. Üretilen makinelerin yenilenebilir enerji kaynaklarına uyum sağlayacak şekilde tasarlanması hedeflenmektedir.

Yenilenebilir enerji kaynakları arasında önemli alternatiflerden birisi organik atıklardan biyogaz üretimidir. Biyogaz, biyokütleden anaerobik sindirim yoluyla elde edilen umut verici bir yenilenebilir enerji kaynağı olarak görülmektedir. Biyogaz, anaerobik (oksijensiz) ortamda organik atıkların uygun mikroorganizmaların etkisiyle parçalanması sonucu ortaya çıkan bir nihai üründür. Biyogaz metandan (%60 ila 70) ve karbondioksitten (%30 ila 40) oluşmaktadır. Bunların yanında biyogaz düşük miktarda su buharı ve hidrojen sülfid içermektedir (Alrbai ve diğ., 2022). Biyogaz uygun bir şekilde kullanıldığında, içten yanmalı motorlar için iyi bir alternatif yakıt olabileceği düşünülmektedir.

Reaktivite kontrollü sıkıştırma ateşlemeli (RCCI, Reactivity Controlled Compression Ignition) motor, iki farklı yakıtın kullanılmasıyla ortaya çıkan oldukça yenilikçi bir yöntemdir (Walker, Wissink, DelVescovo ve Reitz, 2015). RCCI motorlarda emme hattına ve silindir içine enjekte edilen farklı reaktivasyon dereceli yakıtlarla yanma kontrol altına alınabilmektedir. Böylelikle motor verimi ve performans olarak oldukça iyi sonuçlar elde edilmektedir. RCCI sistemde ısı salınımı

üç ayrı aşamada gerçekleşir (Işık ve Aydın, 2016). İlk aşamada soğuk alev reaksiyonları (dizel enjeksiyonu), ikinci aşamada her iki yakıtın karıştırıldığı yerlerde (ilk ısı salınımı) ve son olarak üçüncü aşamada nihai ısı salınımı (ikincil yakıtın bulunduğu yerler)'dir (Reitz ve Duraisamy, 2015).

Dalha, Said, Abdulkarim ve El-Adawy, (2021) RCCI motorda farklı kompozisyonlarda biyogazın ve farklı port karışım mesafelerinin etkilerini araştırmışlardır. Yüksek karbondioksit oranının yanmaya olumsuz etkidiğini tespit etmişlerdir. Mahmoodi, Yari, Ghafouri ve Poorghasemi, (2021) biyogaz bileşenlerini sabitlemek için temizleme ve ıslah işlemi uygulamışlardır ve elde edilen biyogazı bir RCCI motorunda kullanarak yanma, performans ve emisyon özelliklerini incelemişlerdir. Ortalama yanma sıcaklığı %3,5 ila 7,9 arasında düşerken, motor gücü ise %2,3 ila 14,5 düştüğünü gözlemlemişlerdir. NO_x emisyonları ise %50 civarında düştüğü gözlemlenmiştir. Chaudhari ve Deshmukh (2022) RCCI motorda düşük reaktiviteli yakıt olarak benzin, etanol, metanol ve doğalgaz kullanırken, yüksek reaktiviteli yakıt olarak biyodizel ve dizel kullanmışlardır. Çalışmalarında sifıra yakın NO_x ve is emisyonu elde edilmesi ve performansın iyileştirilmesi hedeflenmiştir. Wang, Qian, Zhou ve Lu (2016) biyogaz/dizel RCCI modunda yanma fazını kontrol etmek için ana enjeksiyon zamanlamasını kontrol etmişlerdir. Böylelikle NO_x ve is emisyonunun düştüğünü tespit etmişlerdir. Mahla ve diğ. (2021) motor yükü, n-bütanol oranı ve biyogaz miktarının emisyon ve performans üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Response surface metoduna göre, emisyonları düşürecek ve termal verimi arttıracak, optimal değerleri tespit etmişlerdir.

Daha önce yapılan çalışmalarından da anlaşılacağı üzere, RCCI motorlar yüksek verimleri ve düşük emisyon değerleri dolayısıyla büyük gelecek vaat etmektedirler (Çelik, 2022). Özellikle düşük sıcaklıklı yanma sebebiyle, NO_x emisyonları oldukça azalmaktadır. Bu çalışmada, düşük reaktiviteli yakıt olarak emme hattına biyogaz enjeksiyonunun yanma ve performans etkileri değerlendirilmiştir. Biyogaz yakıtlı RCCI motorun sanki-boyutlu (quasi-dimensional, QD) olarak modellenmesi yapılmıştır. Sanki-boyutlu yaklaşımı, alev cephesi gelişimini basitleştirilmiş bir küresel geometri varsayımıyla ve sonsuz küçük kalınlık olarak modellemektedir. Deneysel doğrulanmış model ile çalışma parametrelerinin etkileri incelenerek, baskın olmayan sıralama genetik algoritması (non-dominated sorting genetic algorithm, NSGA-II) yöntemiyle motor çalışma parametreleri optimize edilmiştir. Bu yöntem ile deneysel çalışma ile mümkün olmayacak ve oldukça zaman alacak, yüzlerce farklı kombinasyon üretilip, simüle edilerek, sonuçlar arasından en uygunları tespit edilmiştir. Bu çalışma ile yenilenebilir bir kaynak olarak biyogazın, içten yanmalı bir motorda yakıt olarak kullanılma potansiyeli değerlendirilmiştir. Ayrıca motorun birçok çalışma parametresinin motor performansına etkileri kapsamlı olarak irdelenmiştir. Motor çalışma parametreleri için optimum değerler elde edilmiştir.

2. Materyal ve Yöntem

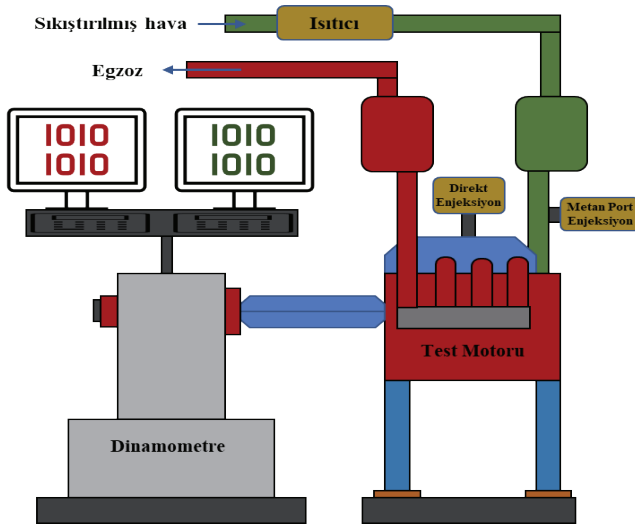
2.1 Test motoru

Caterpillar® 3401 tek silindirli sıkıştırma ateşlemeli motor test amaçlı kullanılmıştır. Test motorunun önemli özellikleri Tablo 1’de belirtilmiştir. Motorun test edildiği laboratuvarın düzeni Şekil 1’de sunulmuştur (Walker ve diğ., 2015). Motor hem direkt enjeksiyon hem de emme manifoldu üzerinden yakıt enjeksiyonu yaparak çalışmaktadır. Port enjeksiyonunda biyogaz yakıtı kullanılırken, direkt enjeksiyon yönteminde dizel yakıtı kullanılmaktadır.

Motorun tüm parametreleri dikkate alınarak, supaplar, enjektör ve silindir bütün olarak modellenmiştir. Motor toplam 4 adet supap içermektedir: 2 emme ve 2 egzoz. Model kurulmasının ardından deneysel olarak doğrulanması gerçekleştirilmiştir.

Tablo 1. Motorunun başlıca özellikleri

Silindir hacmi	2,44 litre
Piston çapı	137,2 mm
Strok	165,1 mm
Biyel kolu uzunluğu	261,6 mm
Sıkıştırma oranı	14,88:1
Enjeksiyon basıncı	50 MPa
Emme supabı kapanma	-143°
Emme supabı açılma	-415°
Egzoz supabı açılma	+130°
Egzoz supabı kapanma	+402°



Şekil 1. Test Motoru Laboratuvar Düzeni

Bu çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

2.2 Motorun Modellemesi

Performansa etkisi incelenen reaktivite kontrollü sıkıştırma ateşleme tipi motorun gerçekçi bir boyutlu modeli kurulmuştur. GT-Suite ticari yazılımı kullanılarak motor modellemesi yapılmıştır (Gamma Technologies, 2016). Silindirdeki yanma, iki bölgeci bir modelle çözülmüştür. Yanma odası yanmış ve yanmamış bölgelere ayrılarak yanma modellemesi yapılmıştır (Medina ve diğ., 2014; Şener, 2021). Aşağıdaki enerji denklemleri her iki bölge için de çözülmüştür.

Yanmamış Bölge:

$$\frac{d(m_u e_u)}{dt} = -p \frac{dV_u}{dt} - \frac{dQ_u}{dt} + \left(\frac{dm_f}{dt} h_f + \frac{dm_a}{dt} h_a \right) + \frac{dm_{f,i}}{dt} h_{f,i} \quad (1)$$

Yanmış Bölge:

$$\frac{d(m_b e_b)}{dt} = -p \frac{dV_b}{dt} - \frac{dQ_b}{dt} + \left(\frac{dm_f}{dt} h_f + \frac{dm_a}{dt} h_a \right) \quad (2)$$

Yukarıdaki denklemlerde; e enerji, p silindir içi basınç, m kütle, m_f yakıt kütlesi, m_a hava kütlesi, $m_{f,i}$ enjekte edilen yakıt kütlesi, Q ısı transfer hızı, V hacim, h_f yakıt kütle entalpisidir. Alt simge "b" yanmış anlamına gelirken, "u" alt simgesi ise yanmamış bölge anlamına gelmektedir.

Yanma modellemesi için Wiebe fonksiyonu kullanılmıştır ve aşağıdaki şekilde tanımlanmıştır:

$$x_b = 1 - \exp\left(-a\left(\frac{\theta - \theta_0}{\Delta\theta}\right)^{m+1}\right) \quad (3)$$

Burada θ krank açısını, x_b yanan kütle oranını, θ_0 yanma başlangıç krank açısını, Δ_0 ve a yanma süresini ve m yanma eğrisinin şeklini belirlemektedir. Δ_0 , a ve m ayarlanabilir sabitlerdir.

Isı yayılım hızı (Apparent heat release rate, AHRR), tek bölge enerji denklemi çözülerek hesaplanmıştır (Gamma Technologies, 2016). Silindir içindeki basınca göre her bir zaman adımı için aşağıdaki denklem hesaplanmaktadır (Yoon ve Park, 2019).

$$AHRR = \left(-p \frac{dV}{dt} - \frac{dQ}{dt} - \frac{d(me)}{dt}\right) \quad (4)$$

Woschni modelinde tanımlanan ısı taşınım katsayısı (Nabi, Rasul ve Brown, 2019):

$$h_{c, \text{Woschni}} = \frac{K_1 p^{0.8} w^{0.8}}{B^{0.2} T^{K_2}} \quad (5)$$

Burada, B piston çapı, K_1 ve K_2 ise Woschni GT modeli için sırasıyla 3,01426 ve 0,5 sabitleridir, p silindir içi basınç ve T silindir içi sıcaklıktır.

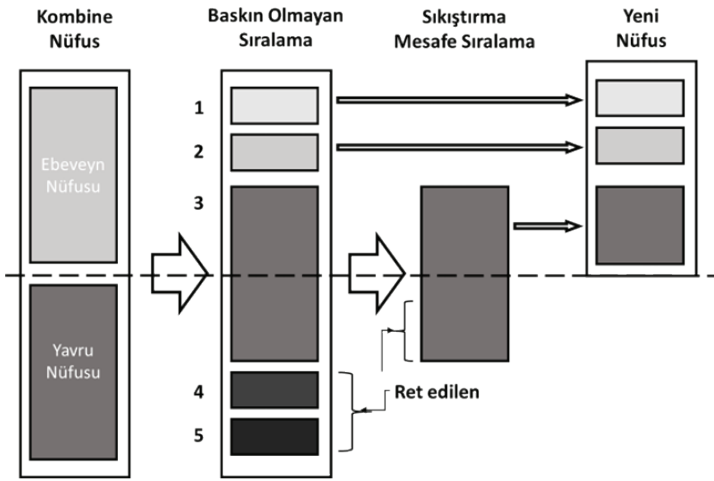
Port ve manifoldlar içindeki akışkan akışını hesaplamak için tek boyutlu Navier-Stokes ve ısı transfer denklemleri kullanılır. Hangi yöne doğru akış olduğunu belirleyen korunum denklemleri vardır. Kütle korunumu, sistemdeki değişim hızına göre tanımlanır:

$$\frac{d(me)}{dt} = p \frac{dv}{dt} + \sum_i \dot{m}_i H - \sum_e \dot{m}_e H - h_g A (T_{gas} - T_{wall}) \quad (6)$$

Burada e iç enerji, H toplam entalpi, T_{gas} akışkan sıcaklığı, h_g ısı transfer katsayısı ve T_{wall} duvar sıcaklıklarıdır. Cidarlarla akışkanlar arasındaki ısı geçişi, ısı transfer katsayısı, cidar ve akışkan sıcaklıklarına bağlıdır. Her adımda, duvar yüzeyinin pürüzlülüğü, akışkan hızı ve termal-fiziksel özelliklerin bir fonksiyonu olarak ısı transfer katsayısı belirlenir.

2.3 Çalışma Parametrelerinin Optimizasyonu

Gerçekçi bir boyutlu model kullanarak, motor performansını optimizasyon çalışması yapılmıştır. RCCI yanması için emme ve egzoz supapları en iyi duruma getirilmesi amaçlanmıştır. Bunun için çalışmada, NSGA-II türü genetik algoritma kullanıldı (Şekil 2). Bu yöntem, doğrusal olmayan birden çok kısıtlama olan ve birçok bağımsız değişkeni olan problemlerin çözümü için uygundur. NSGA-II, baskın olmayan sıralama genetik algoritması (non-dominated sorting genetic algorithm) olarak bilinen bir optimizasyon yöntemidir (Deb, Pratap, Agarwal ve Meyarivan, 2002). Bu yöntem, birden çok amaç fonksiyonu olan, doğrusal olmayan ve birden çok kısıtlamalı problemlerin çözümü için kullanılır.



Şekil 2. NSGA-II genetik algoritma yönteminin şematik gösterimi.

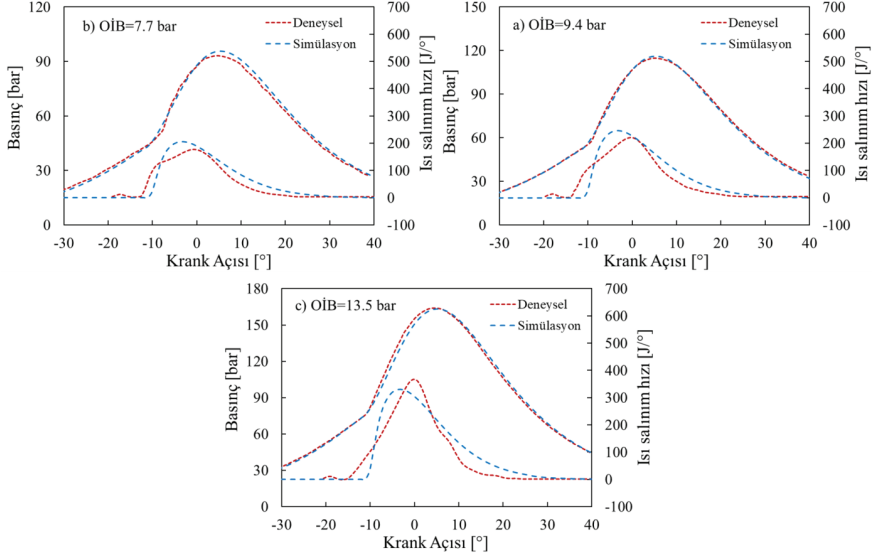
Genetik algoritma yöntemi, 20 popülasyon ve 10 nesil çerçevesinde uygulanmıştır. Toplam 200 iterasyon gerçekleştirilmiştir. Her bir parametre, iterasyon çözümlenirken, ortalama indike basınç (OİB), güç ve özgül yakıt tüketimi (ÖYT) gibi motor özelliklerinin istenilen değerin altına düşmediği kontrol edilmiştir.

3. Bulgular ve Tartışma

3.1 Modelin Doğrulanması

Motorun modeli hazırlandıktan sonra, deneysel sonuçlarla uyumluluğu test edilmiştir. Ortalama indike basınç (OİB) değeri 7,7; 9,4 ve 13,5 bar olan üç farklı deneysel sonuçla karşılaştırılmıştır (Ebrahimi, Najafi, Jazayeri ve Mohammadzadeh, 2018; Koç ve Şener, 2021). Deneysel çalışmadaki motor parametreleri

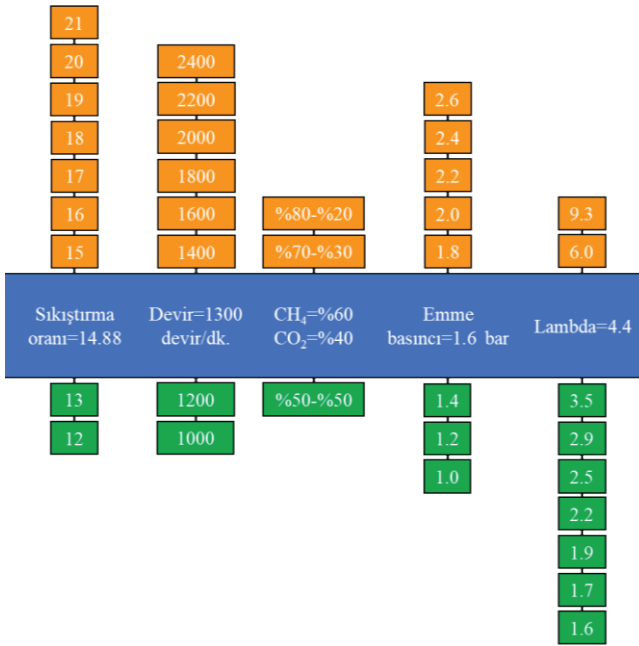
modele tanımlanmıştır. Şekil 3'te görüldüğü gibi modelin silindir içi basınç ve ısı salınım değerleri deneysel sonuçlarla uyumludur. Motor modeli, deneysel ve simülasyon ile elde edilen sonuçların silindir içi basınç ve ısı salınım hızı değerleriyle karşılaştırılarak kalibre edilmiştir.



Şekil 3. Modelin a) 7,7 Bar b) 9,4 Bar ve c) 13,5 bar OİB'de Deneysel Doğrulanması

3.2 Parametrik Simülasyon Çalışması

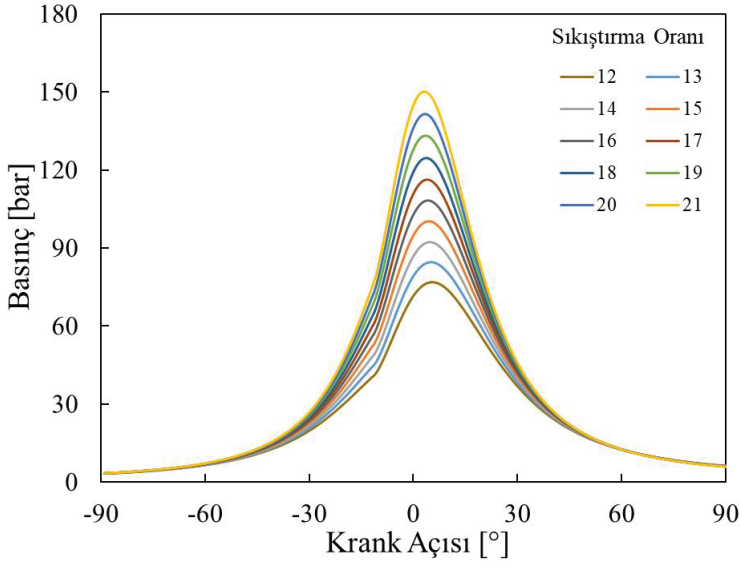
Motor modelinin doğrulama çalışması ardından, motor parametrelerinin yanma ve performansa etkisi incelenmiştir. Şekil 4, yapılan simülasyon çalışmalarının test matrisini göstermektedir. Şeklin ortasındaki mavi kısımdaki değerler mevcut (baseline) durumu ifade etmektedir. Yeşil ve turuncu kısımlar ise parametrik çalışmada kullanılan değerleri ifade etmektedir. Parametrik çalışmalarda, yalnızca bir değer değiştirilerek, bu değerlerin etkisi incelenirken, diğer bütün parametreler sabit tutulmuştur.



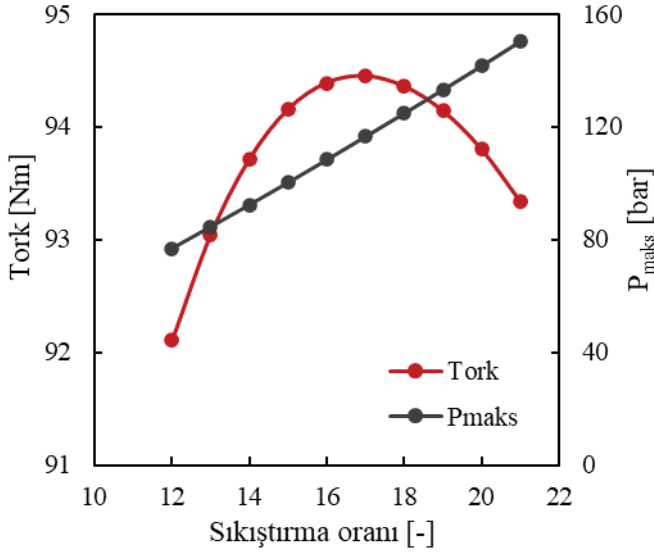
Şekil 4. Simülasyon Çalışmaları İçin Test Matrisi

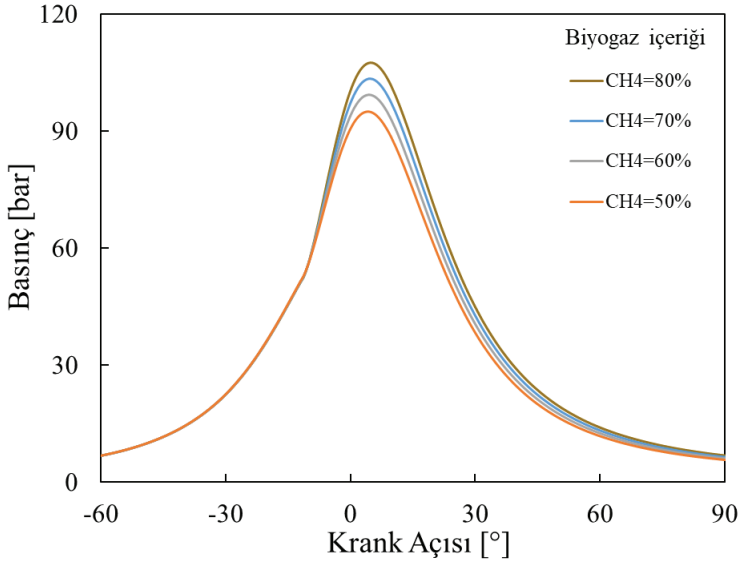
3.2.1 Sıkıştırma Oranının Etkisi

Motor performansının ve yanma etkinliğinin sıkıştırma oranına göre nasıl değiştiği incelendi. Diğer motor parametrelerinin sabit kalırken, sıkıştırma oranı değiştirildi. Motor, 1300 devir/dk hızda çalışırken, yakıt eşdeğerlik oranı 0,3 olarak belirlendi. Şekil 5'te görüldüğü gibi, sıkıştırma oranı arttıkça, silindir içi basınç değeri de yükselmeye başlamaktadır. Sıkıştırma oranı 12 iken maksimum basınç 76,8 bar iken, sıkıştırma oranı 20'ye çıkartıldığında 150,2 bar olmaktadır. Motor gücü, sıkıştırma oranıyla birlikte artarken, bir değerden sonra azalmaya başlamıştır. Bunun en önemli sebebi ise sıkıştırmaya harcanan işin artmasıdır. Tork değeri için de benzer bir karakter ortaya çıkmaktadır. Maksimum tork ise 17 sıkıştırma oranıyla 94,45 Nm olarak elde edilmektedir (Şekil 6). Sıkıştırma oranı 17 iken, güç ve BSFC değeri sırasıyla 17,24 hp ve 182,64 g/kWh'tir (Şekil 7).



Şekil 5. Farklı Sıkıştırma Oranlarına Göre Silindir İçi Basıncın Değişimi

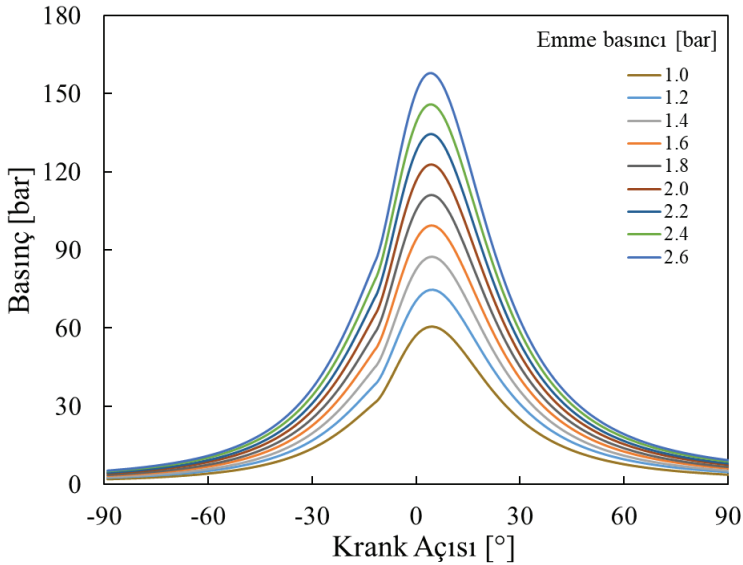
Şekil 6. Farklı Sıkıştırma Oranlarında Tork ve P_{maks} Değerleri



Şekil 7. Farklı Sıkıştırma Oranlarında Güç ve ÖYT Değerleri

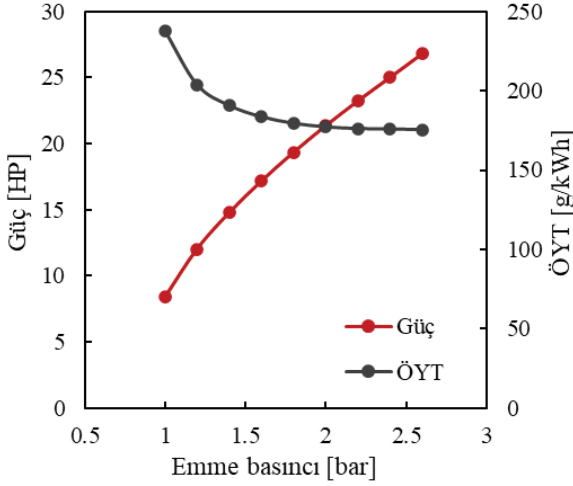
3.2.2 Emme Basıncının Etkisi

RCCI motorda emme basıncının etkisi incelenmiştir. Diğer parametreler sabit tutularak, eş değerlik oranı 0,3 olarak belirlenmiştir. Farklı emme basınçların-

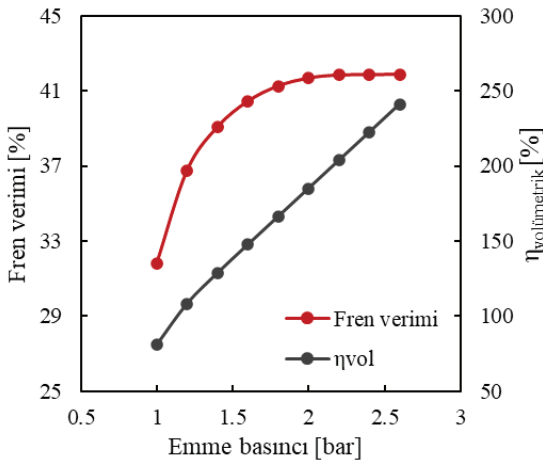


Şekil 8. Farklı Emme Basınçlarına Göre Silindir İçi Basıncın Değişimi

da silindir içi basınç değerinin krank açısıyla değişimi Şekil 8'de verilmektedir. Emme basıncının artmasıyla, silindir içi basınç değerinin arttığı görülmektedir. Şekil 9 ise ÖYT değeri 2,2 ile 2,6 bar arasında 175 g/kWh olarak minimum değerini almaktadır. BTE ise maksimum %41,9 değerine ulaşırken, minimum %31,8 değerine kadar da düşmektedir (Şekil 10). Maksimum BTE 1.8 bar emme basıncından sonra çok fazla artmamaktadır. Buna karşılık silindir içi basınç değeri çok artış göstermektedir.



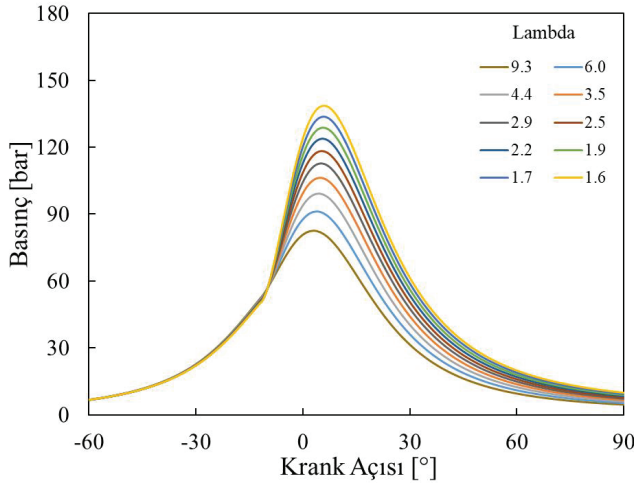
Şekil 9. Farklı Emme Basınçlarında Güç ve ÖYT Değerleri



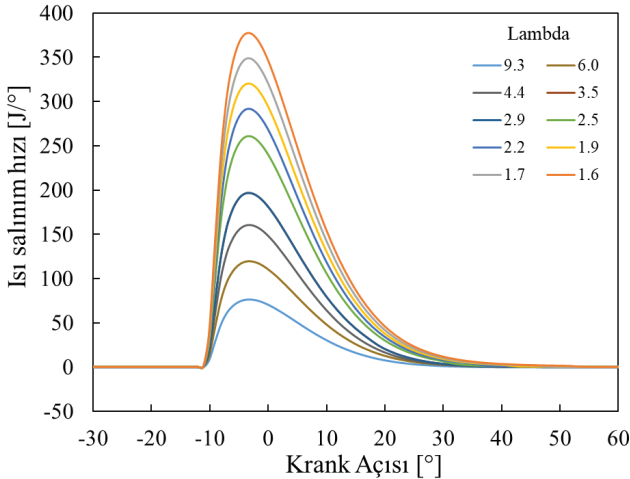
Şekil 10. Farklı Emme Basınçlarında Fren Verimi Ve Volümetrik Verim Değerleri

3.2.3 Lambda Sayısının Etkisi

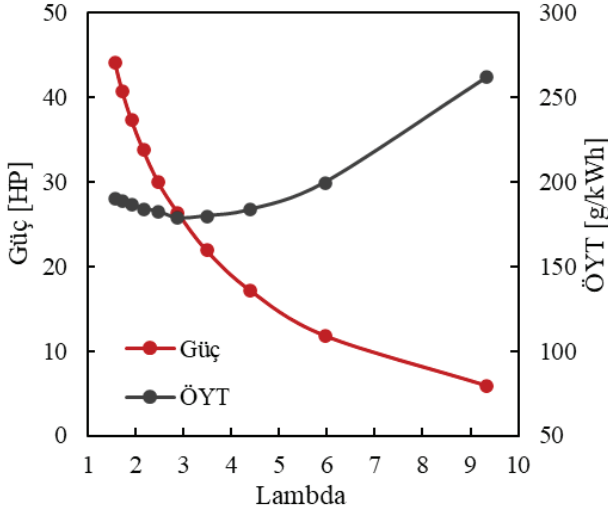
Lambda değeri arttıkça, güç ve tork değerleri de azalmaktadır. Silindir içi basınç ve ısı salınım hızının krank açısına bağlı değişimi Şekil 11 ve 12’de verilmiştir. Lambda değeri azaldıkça silindir içi basınç ve ısı salınım hızı artmaktadır. Şekil 13’te ÖYT değeri, lambda değeri artışıyla bir miktar azalırken, daha sonra artış göstermiştir. ÖYT değerinin en düşük olduğu, lambda değeri 2’dir. Bu lambda değerinde, ÖYT, 178,7 g/kWh’e kadar düşmektedir. Fren verimi değeri ise lambda 2,0-2,5 değerlerinde %41,05 olarak maksimum değerini almaktadır (Şekil 14). Güç ve tork değeri lambda artışıyla düşmektedir.



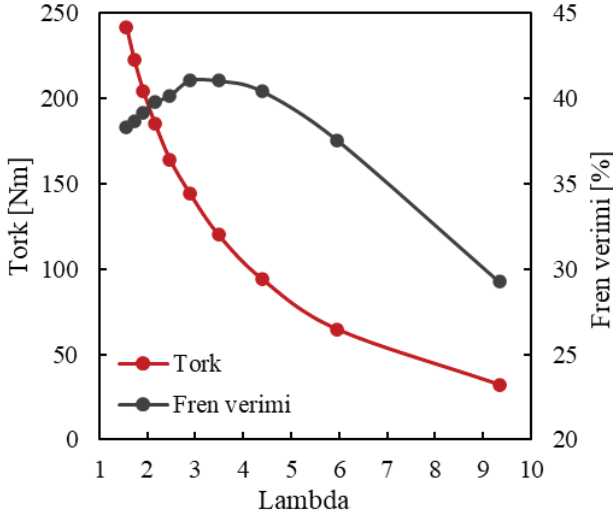
Şekil 11. Farklı Lambdaya Göre Silindir İçi Basıncın Değişimi



Şekil 12. Farklı Lambdaya Göre Isı Salınım Hızının Değişimi



Şekil 13. Farklı Lambda Sayılarında Güç ve ÖYT Değerleri

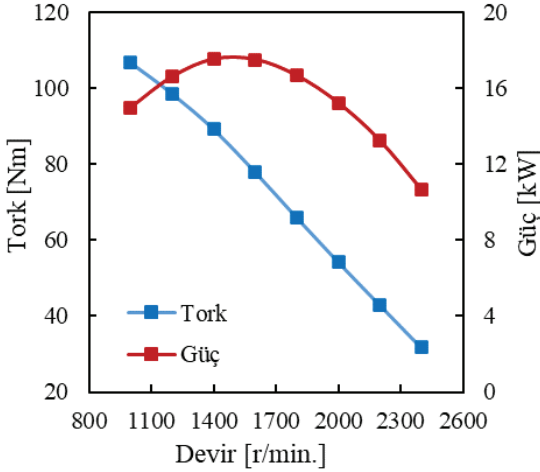


Şekil 14. Farklı lambda Sayılarında Tork Ve Fren Verimi Değerleri

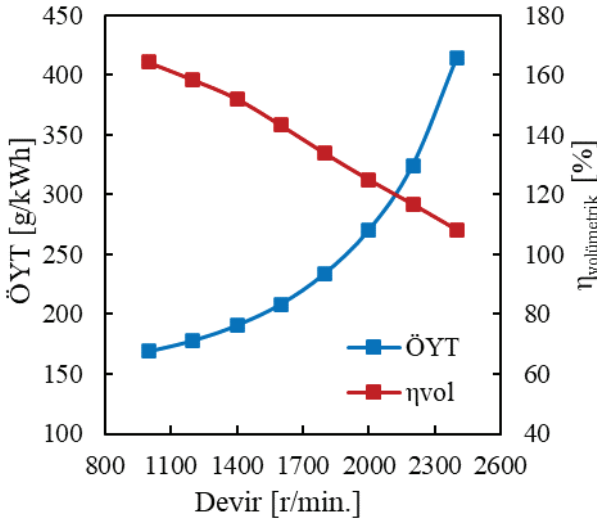
3.2.4 Devir Sayısının Etkisi

Farklı devir aralıklarında motorun çalışma performansı incelenmiştir. Motor, 1000 ila 2400 devir/dk. aralığındaki devir sayılarında simüle edilmiştir. Sıkıştırma oranı 14,88 ve yakıt eşdeğerlik oranı 0,3 olarak belirlenirken, maksimum güç 1500 devir/dk.'da alınmıştır. Tork, devir sayısı ile beraber düşmektedir (Şe-

kil 15). ÖYT değeri en düşük değerini 1000 ila 1500 devir/dk. aralığında alır ve yüksek devirlerde artar (Şekil 16).



Şekil 15. Farklı Motor Devirlerinde Tork ve ÖYT Değerleri

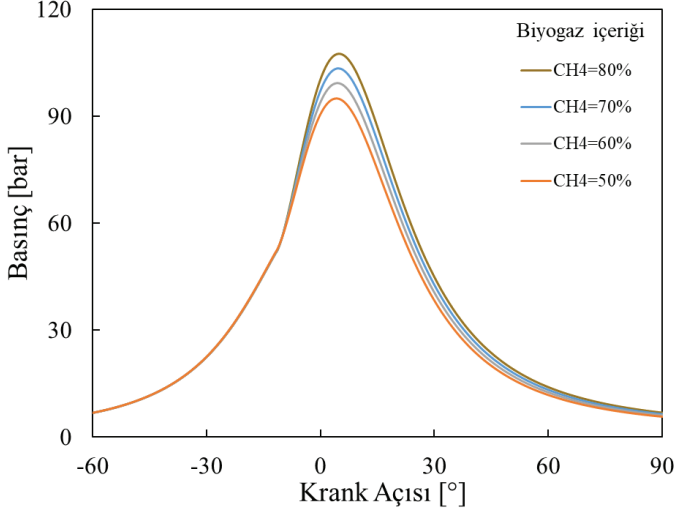


Şekil 16. Farklı Motor Devirlerinde ÖYT ve Volümetrik Verim Değerleri

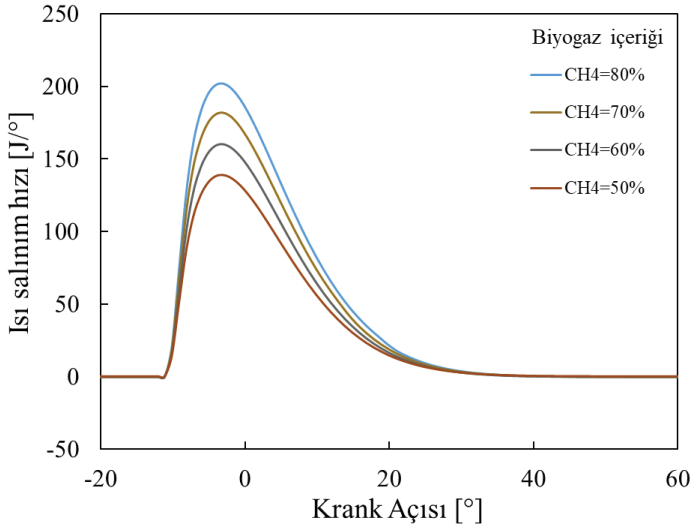
3.2.5 Biyogaz Bileşiminin Etkisi

Biyogaz, büyük oranda metan ve karbondioksitten oluşmaktadır. Metan oranı, artması, biyogazın ısıl değerinin artması anlamına gelmektedir. Buna göre, biyo-

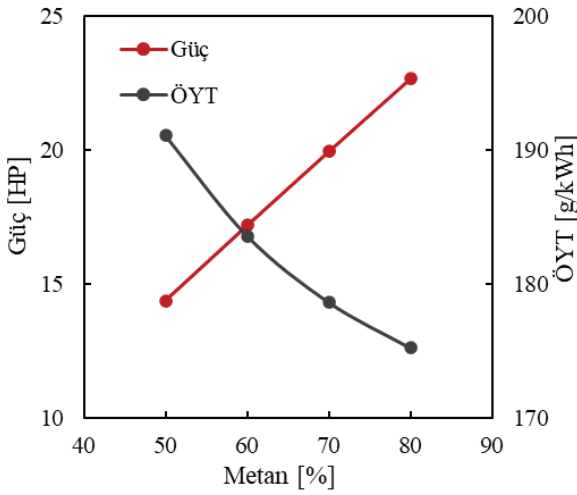
gazdaki metan oranının artması, güç ve torkun artmasına, ÖYT değerinin de azalmasına sebep olmaktadır. Şekil 17'de yüksek metan oranıyla, daha yüksek silindirik içi basınç değeri oluşturmaktadır. Metan oranının artmasıyla ısı salınım hızı da artmaktadır (Şekil 18). Metan oranının artışıyla, güç artarken, ÖYT düşmektedir (Şekil 19).



Şekil 17. Farklı Biyogaz Oranlarında Silindir İçi Basıncın Değişimi



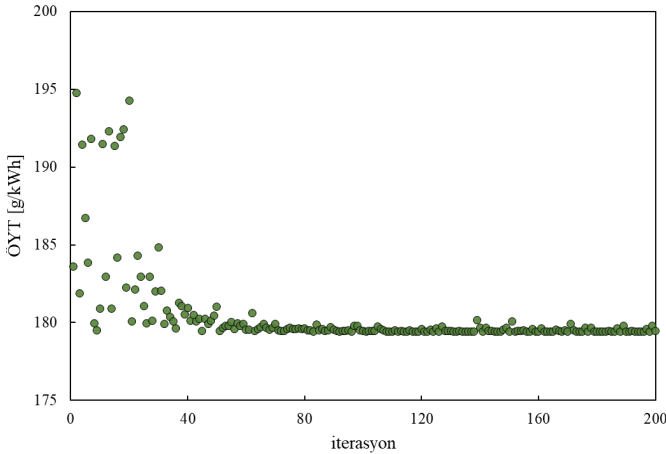
Şekil 18. Farklı Biyogaz Oranlarında Isı Salınım Hızının Değişimi



Şekil 19. Farklı Metan Oranlarında Güç ve ÖYT Değerleri

3.3 Supap Zamanlamalarının Optimizasyonu

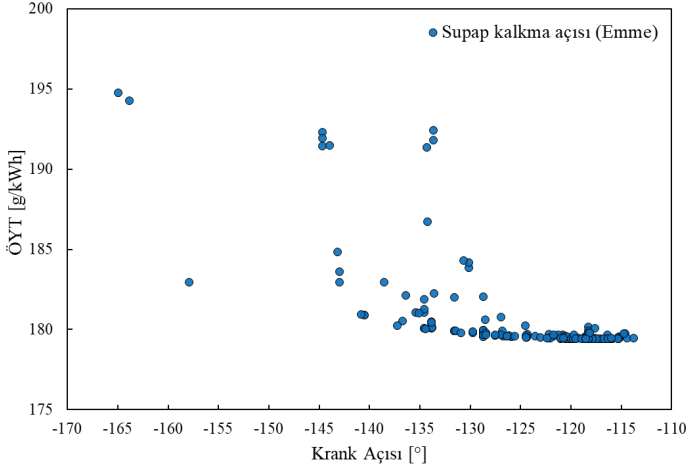
Supap zamanlamalarının motor karakteristiğine uygun olarak tasarlanması, bir motorun verimliliği için kritik öneme sahiptir. Bu amaçla, NSGA-II yöntemi kullanılarak supapların açılma ve kapanma zamanları en yüksek verimi ve en düşük ÖYT değerini elde etmek için optimize edilmiştir. Toplamda 200 farklı senaryo çözülmüştür ve sonuçlar 80. iterasyondan sonra minimum ÖYT değerini elde etmiş, 200. iterasyona kadar çok fazla değişim göstermemiştir (Şekil 20).



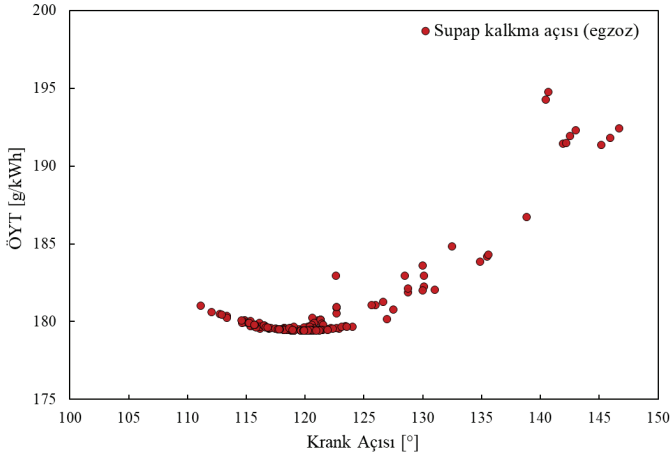
Şekil 20. Yapılan İterasyonlar Boyunca Özgül Yakıt Tüketimi Değerinin Değişimi

Emme ve egzoz supabının farklı değerlerine göre, özgül yakıt tüketiminin değişimi

mi, Şekil 21 ve 22’de görülmektedir. Yapılan optimizasyon çalışmasında, genetik algoritma emme supabı için 60° krank açılık aralığı tararken, egzoz supabı için 40° krank açılık aralık tarayarak, optimum değeri bulmayı hedeflemiştir. Emme ve egzoz supabının zamanlamalarına bağlı olarak, ÖYT değeri 180 g/kWh ila 195 g/kWh arasında değişmektedir. Emme supabının kapanma açısı üst ölü noktadan önce 125° ila 115° krank açısı değerinde, ÖYT değeri minimum değerini almaktadır. Egzoz supabının açılma açısı üst ölü noktadan sonra 115° ila 120° krank açısında, ÖYT değeri minimum değeri almaktadır.

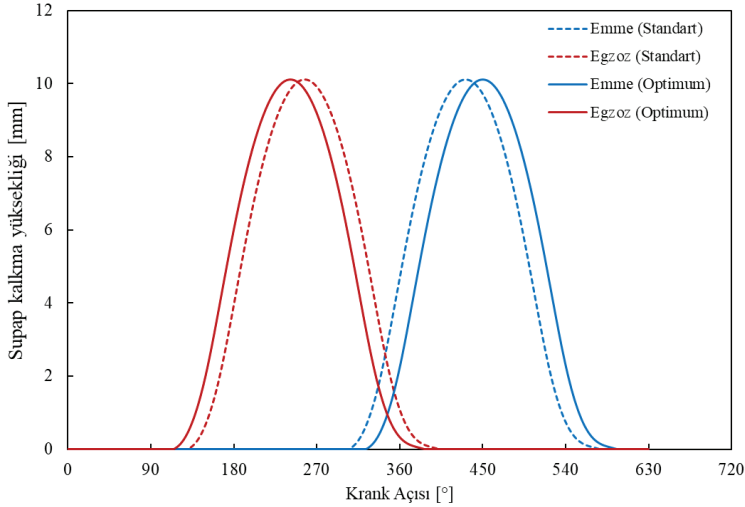


Şekil 21. Özgül Yakıt Tüketimi Değerinin Emme Supabı Kapanma Açısına Bağlı Olarak Değişimi



Şekil 22. Özgül Yakıt Tüketimi Değerinin Egzoz Supabı Açılma Açısına Bağlı Olarak Değişimi

Emme supabı kapanma açısı, üst ölü noktadan $124,4^\circ$ önce olarak ayarlandığında ve egzoz supabı açılma açısı, üst ölü noktadan $114,5^\circ$ sonra olarak ayarlandığında optimum zamanlamalar olmaktadır. Mevcut ve Optimum durumlarda krank açısına bağlı supap kalkma yüksekliği değerleri Şekil 23'te gösterilmiştir.

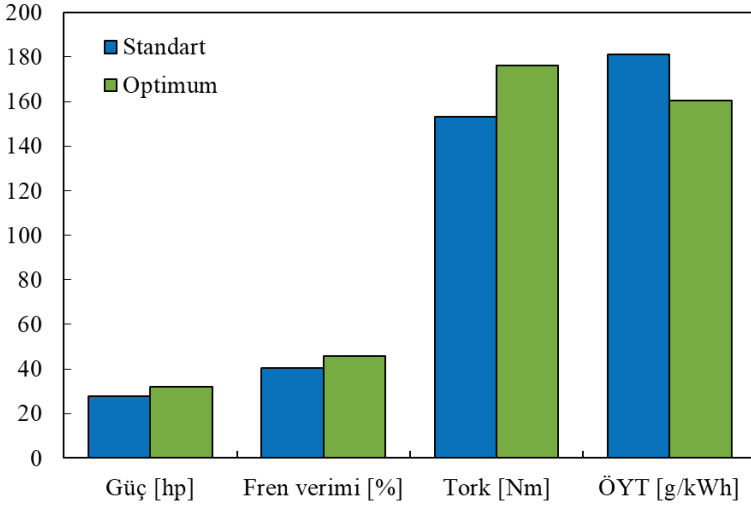


Şekil 23. Mevcut ve Optimum Durumlarda Krank Açısına Bağlı Supap Kalkma Yüksekliği Değerleri

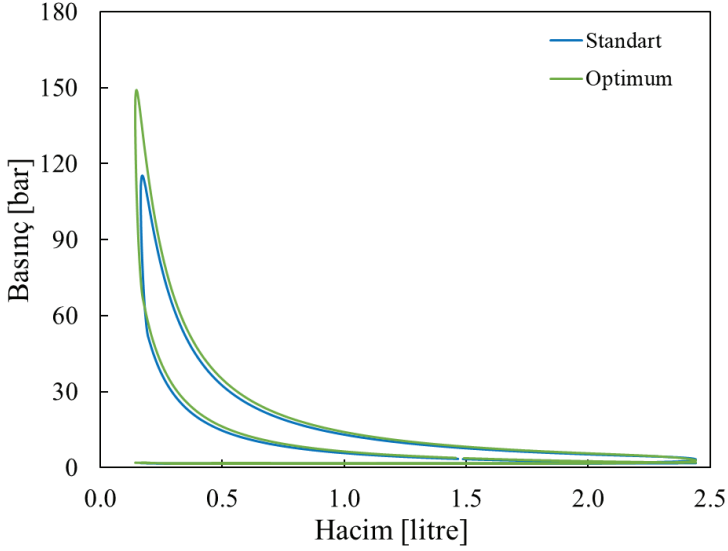
3.4 Optimize Edilmiş Motorun Nihai Simülasyon Sonuçları

Yapılan çalışmalara göre, supap zamanlamaları optimize edilmiştir. Sıkıştırma oranı 17 değeri seçilmiştir. Emme basıncı 1,8 bar olarak ayarlanmıştır. Optimum ve standart durumun güç, BTE, tork ve ÖYT değerleri Şekil 24'te karşılaştırılmıştır. Yapılan bu çalışmalara göre, optimum durumda, motor güç ve tork değeri %15,1 oranında artmıştır. Fren verimi değeri ise %12,7 oranında artmış ve ÖYT değeri %11,3 oranında azalmıştır.

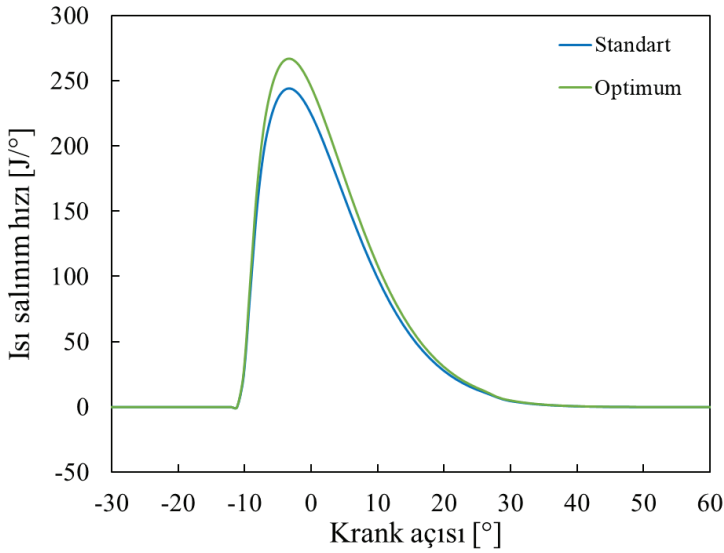
Optimum ve standart durumunun silindir içi basınç, hacim grafiği Şekil 25'te görülmektedir. Maksimum basıncın yükselmesiyle birlikte, güç değerine olumlu etki yapmıştır. Buna göre, yanmanın iyileşmesiyle, ısı yayılma hızının arttığı görülmektedir (Şekil 26).



Şekil 24. Mevcut ve Optimum Durumun Güç, Verim, Tork ve ÖYT Değerlerinin Karşılaştırılması



Şekil 25. Mevcut ve Optimum Durumun Silindir İçi Basınc Karşılaştırılması



Şekil 26. Mevcut ve Optimum Durumun Isı Salınım Hızının Karşılaştırılması

4. Sonuçlar ve Öneriler

Bu çalışmada, biyogaz yakıtlı reaktivite kontrollü sıkıştırma ateşlemeli motorun performansı, sanki boyutlu model kullanarak değerlendirildi. Bu model deneysel verilerle doğrulandı. Simülasyon sonuçlarına göre biyogazın lambda sayısı, motor devir sayısı, sıkıştırma oranı ve emme basıncı gibi faktörlerin motor performansına etkisi araştırıldı. Biyogazın bileşimi de motor performansına etkileri incelendi. Supapların açılma ve kapanma açıları NSGA-II yöntemiyle, reaktivite kontrollü sıkıştırma ateşlemeli motor kavramına uygun olarak optimize edildi. Simülasyon çalışmalarının sonuçlarına göre:

- Test motorunda maksimum güç ve tork, sıkıştırma oranı 17 ile elde edildi. Bu değer motorun maksimum verimle çalıştığı değerdir.
- Maksimum verim, emme basıncı 2,6 bar ile sağlandı ancak bu değerde silindir içi maksimum basınç oldukça artmaktadır.
- Biyogazın lambda değeri 4 civarında minimum ÖYT değeri elde edildi.
- 1500 devir/dk civarında maksimum güç ve minimum ÖYT değeri elde edildi.
- Yakıt bileşeninde metan oranı arttıkça motor gücü artmaktadır.
- Optimizasyon çalışmaları sonucunda optimum motor parametreleri belirlendi ve motor güç ve tork değeri %15,1 arttı.
- ÖYT değeri %11,3 azaldı ve fren verimi değeri %12,7 arttı.

Biyogaz reaktivite kontrollü sıkıştırma ateşlemeli motorlar, düşük emisyon ve yüksek verim potansiyeli ile umut vericidir. Biyogaz, yenilenebilir enerji kaynağı olarak, reaktivite kontrollü sıkıştırma ateşlemeli motorlarda kullanılabilir.

Gelecek çalışmalarda, elde edilen optimum parametreler hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) yöntemleri ile irdelenebilir ve daha yüksek verimli ve daha düşük emisyonlu motor geliştirilmesi sağlanabilir. Bu tür motorlar, ayrıca, jeneratör ve yol dışı amaçlar için kullanılabilir.

Kaynakça

- Aghahosseini, A., Solomon, A.A., Breyer, C., Pregger, T., Simon, S., Strachan, P. ve Jäger-Waldau, A. (2023). Energy system transition pathways to meet the global electricity demand for ambitious climate targets and cost competitiveness. *Applied Energy*, 331, 120401. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.120401>
- Alptekin, E., Şanlı, H. ve Çanakçı, M. (2022). Effects of Biodiesel Fuels Produced from Vegetable Oil and Waste Animal Fat on the Characteristics of a TDI Diesel Engine. *European Journal of Technic*. 12(1) 36–42 Doi: <https://doi.org/10.36222/ejt.1013758>
- Alrbai, M., Ahmad, A. D., Al-Dahidi, S., Abubaker, A. M., Al-Ghussain, L., Hayajneh, H. S. ve Akafuah, N. K. (2022). Effect of hydrogen sulfide content on the combustion characteristics of biogas fuel in homogenous charge compression ignition engines. *Case Studies in Thermal Engineering*, 40, 102509. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.csite.2022.102509>
- Atılğan, S. ve Yılmaz, A. (2021). Mardin İlinin Hayvansal Gübre Kaynaklı Biyogaz Potansiyelinin Belirlenmesi. *Mühendis ve Makina*. 62 (704), 429–445 Doi: <https://doi.org/10.46399/muhendismakina.874857>
- Çelik, T. (2022). *Biyogaz yakıtlı reaktivite kontrollü sıkıştırma ateşlemeli bir motorun modellenmesi ve çalışma parametrelerinin optimizasyonu* (Yüksek Lisans Tezi). Batman Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Batman.
- Chaudhari, V.D. ve Deshmukh, D. (2022). Fuel flexibility study of various fuels with charge dilution and high compression ratio for medium-load operating RCCI engine. *Fuel*, 310, 122163. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.122163>
- Dalha, I. B., Said, M. A., Abdul Karim, Z. A. ve El-Adawy, M. (2021). Effects of port mixing and high carbon dioxide contents on power generation and emission characteristics of biogas-diesel RCCI combustion. *Applied Thermal Engineering*, 198, 117449. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaling.2021.117449>

- Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S. ve Meyarivan, T. (2002). A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*. Doi: <https://doi.org/10.1109/4235.996017>
- Ebrahimi, M., Najafi, M., Jazayeri, S. A. ve Mohammadzadeh, A. R. (2018). A detail simulation of reactivity controlled compression ignition combustion strategy in a heavy-duty diesel engine run on natural gas/diesel fuel. *International Journal of Engine Research*, 19(7), 774–789. Doi: <https://doi.org/10.1177/1468087417730486>
- Gamma Technologies. (2016). GT-Suite Engine Performance Application Manual. Westmont, USA: Gamma Technologies: www.gtisoft.com
- Işık, M. Z. ve Aydın, H. (2016). Analysis of ethanol RCCI application with safflower biodiesel blends in a high load diesel power generator. *Fuel*, 184, 248–260. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2016.07.017>
- Karaca, C. (2017). Hatay İlinin Hayvansal Gübre Kaynağından Üretilen Biyogaz Potansiyelinin Belirlenmesi. *Mustafa Kemal Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 22(1), 34–39.
- Koç, E. ve Kaya, K. (2015). Enerji Kaynakları–Yenilenebilir Enerji Durumu. *Mühendis ve Makina*, 56(668), 36–47. Doi: <https://dergipark.org.tr/en/doi/10.36222/ejt.823439>
- Koç, M. A. ve Şener, R. (2021). Prediction of emission and performance characteristics of reactivity-controlled compression ignition engine with the intelligent software based on adaptive neural-fuzzy and neural-network. *Journal of Cleaner Production*, 318, 128642. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128642>
- Mahla, S. K., Ardebili, S. M. S., Sharma, H., Dhir, A., Goga, G. ve Solmaz, H. (2021). Determination and utilization of optimal diesel/n-butanol/biogas derivation for small utility dual fuel diesel engine. *Fuel*, 289, 119913. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.119913>
- Mahmoodi, R., Yari, M., Ghafouri, J. ve Poorghasemi, K. (2021). Effect of reformed biogas as a low reactivity fuel on performance and emissions of a RCCI engine with reformed biogas/diesel dual-fuel combustion. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(30), 16494–16512. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.09.183>
- Medina, A., Curto-Risso, P. L., Hernández, A. C., Guzmán-Vargas, L., Angulo-Brown, F. ve Sen, A. K. (2014). Thermodynamic Optimization to Cyclic Variability: *Quasi-Dimensional Simulation of Spark Ignition Engines*. Londra: Springer Nature.

- Nabi, M. N., Rasul, M. G. ve Brown, R. J. (2019). Influence of diglyme addition to diesel-biodiesel blends on notable reductions of particulate matter and number emissions. *Fuel*, 253, 811–822. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.05.072>
- Reitz, R. D. ve Duraisamy, G. (2015). Review of high efficiency and clean reactivity controlled compression ignition (RCCI) combustion in internal combustion engines. *Progress in Energy and Combustion Science*, 46, 12–71. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.peccs.2014.05.003>
- Savcı, İ. H., Şener, R. ve Duman, İ. (2022). A study of signal noise reduction of the mass air flow sensor using the flow conditioner on the air induction system of heavy-duty truck. *Flow Measurement and Instrumentation*, 83(1), 102121. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2022.102121>
- Şener, R. (2022). Numerical Investigation of Ducted Fuel Injection Strategy for Soot Reduction in Compression Ignition Engine. *Journal of Applied Fluid Mechanics*, 15(2), 475–489. Doi: <https://doi.org/10.47176/jafm.15.02.33088>
- Şener, R. (2021). Homojen Dolgulu Sıkıştırma Ateşlemeli Bir Motorda Supap Profili Optimizasyonu. *International Journal of Advances in Engineering and Pure Sciences*, 33(3), 478–486. Doi: <https://doi.org/10.7240/jeps.895951>
- Şener, R. (2022). Ducted fuel injection: Numerical study of soot formation and oxidation using detailed soot modeling approach in a compression ignition engine at different loads. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 44(1), 45. Doi: <https://doi.org/10.1007/s40430-021-03356-z>
- Walker, N. R., Wissink, M. L., DelVescovo, D. A. ve Reitz, R. D. (2015). Natural gas for high load dual-fuel reactivity controlled compression ignition in heavy-duty engines. *Journal of Energy Resources Technology, Transactions of the ASME*, 137(4), 1–7. Doi: <https://doi.org/10.1115/1.4030110>
- Wang, W., Fan, L. W. ve Zhou, P. (2022). Evolution of global fossil fuel trade dependencies. *Energy*, 238, 121924. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.121924>
- Wang, X., Qian, Y., Zhou, Q. ve Lu, X. (2016). Modulated diesel fuel injection strategy for efficient-clean utilization of low-grade biogas. *Applied Thermal Engineering*, 107, 844–852. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.appltherm.2016.07.057>
- Yoon, W. ve Park, J. (2019). Parametric study on combustion characteristics of virtual HCCI engine fueled with methane–hydrogen blends under low load conditions. *International Journal of Hydrogen Energy*. 44(29) 15511–15522 Doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.04.137>