

Homojen Dolgulu Sıkıştırma Ateşlemeli Bir Motorda Supap Profili Optimizasyonu

Optimization of Valve Profile for a Homogeneous Charge Compression Ignition Engine

Ramazan ŞENER¹ 

¹ Batman Üniversitesi, Otomotiv Mühendisliği Bölümü, 72100, Batman, Türkiye

Öz

İçten yanmalı motorların giderek sıkılaştıran emisyon standartları dolayısıyla, farklı konseptlerle yanma gerçekleştirilmesi ve emisyonlarının azaltılması amaçlanmaktadır. Homojen dolgulu sıkıştırma ateşlemeli motorlarda, görece düşük sıcaklıklarda yanma meydana geldiğinden dolayı, çok düşük NO_x ve is emisyonları açığa çıkmaktadır. Ancak yanma prosesi, vuruntusuz ve teklemez olarak gerçekleşebilmesi için motorun iyi bir şekilde kontrol edilmesi ve bütün parametrelerinin optimize edilmesi gerekmektedir. Bu çalışmada, homojen dolgulu sıkıştırma ateşlemeli dizel yakıtlı bir motorun, bu yeni nesil yanma stratejisine uygun olarak supap profili bir boyutlu yanma modeli ve genetik algoritma kullanılarak optimize edilmiştir. Supap açılma ve kapanma krank açıları parametrik olarak değiştirilmiştir. Ayrıca, supap profilinin tamamen açıldığı noktaya bekleme eklenmiştir. Böylelikle, volümetrik verim artışı hedeflenmiş ve fren gücü değeri maksimize edilmiştir. Tasarlanan yeni supap profili ile motor fren gücü %28 artarken, özgül yakıt tüketimi değeri %6 azalmıştır.

Anahtar kelimeler: Homojen Dolgulu, sıkıştırma ateşlemeli, optimizasyon, supap profili, genetik algoritma.

Abstract

It is aimed to occur combustion process with different concepts to decrease emissions, due to the increasingly stringent emission standards of internal combustion engines. Since combustion occurs at relatively low temperatures in a homogeneous charged compression ignition (HCCI) engines, NO_x and soot emissions were emitted a very low level. However, in order for the combustion process to be carried out without knock and misfire, the HCCI engine must be well controlled, and all engine parameters must be optimized. In this study, the valve profile of an HCCI diesel engine has been optimized using a one-dimensional combustion model and genetic algorithm in accordance with this combustion strategy. Valve opening and closing timings have been changed parametrically. In addition, the dwell angle has been added to the point where the valve profile is fully opened. Thus, the volumetric efficiency increase was targeted, and brake power was maximized. With this newly implemented valve profile, engine brake power increased by 28%, while brake specific fuel consumption value decreased by 6%.

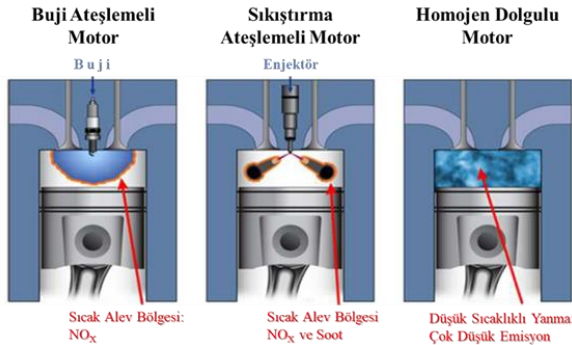
Keywords: Homogeneous charge, compression-ignition engine, optimization, valve profile, genetic algorithm.

I. GİRİŞ

İçten yanmalı motorlar, birçok avantajıyla günümüzde oldukça yaygın olarak kullanılmaktadırlar. Yüksek güç yoğunluğuna ve yakıt verimliliğine sahip olmakla birlikte, oldukça olgunlaşmış, güvenilir bir teknolojidir. Ancak gittikçe sıkılaştıran emisyon standartlarından dolayı, emisyon değerleri mümkün olduğunca azaltılması için çalışmalar yapılmaktadır [1–6]. Homojen dolgulu sıkıştırma ateşlemeli motorlar, düşük emisyon değerleri ile ümit vaat etmektedirler [7]. Bu tür motorlarda enjeksiyon emme safhasında yapılı ve yakıt-hava karışımının tutuşması için sıkıştırma sonucu meydana gelen sıcaklık artışı kullanılır. Yani enjeksiyon zamanı benzinli motorlara benzerken, karışımı tutuşturma yöntemi dizel motorlara benzemektedir. Buji ateşlemeli motorlarda, bujinin yakıt-hava karışımını tutuşturması anındaki gibi ani sıcaklık artışı olmaz. Sıkıştırma ateşlemeli motorlardaki üst ölü noktaya yakın, yakıt enjeksiyonuna bağlı olarak, yine ani tutuşma sonucu yüksek sıcaklık artışı olmaz. Dolayısıyla, bu tür motorlarda NO_x ve is emisyonları oldukça düşük miktarda salınmaktadır (şekil 1).

Homojen dolgulu sıkıştırma ateşlemeli motorlar, oldukça yüksek yanma verimi sağlamaktadırlar. Ancak buji ve sıkıştırma sonuna yakın yakıt enjeksiyonu olmamasından dolayı motorun kontrolü zorlaşmaktadır. Motorun vuruntulu çalışması ve tekleme gibi sorunların üstesinden en uygun karışımın teşkili ile gelinebilir. Hava-yakıt oranının en uygun şekilde silindir içine verilmesi gerektiği gibi, supap zamanlamaları da en optimum değerler garanti edilmesi gerekmektedir. Bu tür motorların, en yüksek verimde çalışması için oldukça fazla çalışma yapılmaktadır. Yapılan çalışmalardan bir kısmı aşağı sunulacaktır [6-12];

Fiveland ve Assanis homojen dolgulu sıkıştırma-ateşlemeli (HCCI) dört zamanlı bir motorun yanma ve performans çalışmaları için bir simülasyon geliştirmişlerdir. Yanma, bir kinetik mekanizma ile tanımlanmıştır. CHEMKIN kütüphanesi, gaz değişimi, türbülans ve ısı transferi modellerini içeren, bir motor simülasyonuna entegrasyon için uygun bir kimyasal kinetik çözücü formüle etmek için kullanmışlardır. Çalışmalarında, HCCI motor süreçlerinin fiziksel modellerle birleştirilmesinin önemini göstermektedirler [8]. Tian ve diğ. HCCI motoru daha efektif kullanmak için, çok modlu yanma stratejisini geliştirmişlerdir. Orta ve düşük yükler için HCCI yanma modu kullanılmasını, yüksek yük ve hızlar için buji ateşlemeli modu kullanılmasını önermektedirler. Kam profili buji ateşlemeli mod için supap bindirmesi uygularken, HCCI modda negatif supap bindirmesi uygulamaktadırlar. Gaz keleşi konumunun HCCI yanması üzerindeki etkisini dikkatlice inceleyerek, yanma modu anahtarı bir motor döngüsünde gerçekleştirmişlerdir. Tüm süreçte, vuruntu ve tekleme gibi herhangi bir anormal yanma olmamasını garanti etmek çalışmanın amacını oluşturmaktaydı [9].



Şekil 1. İçten yanmalı motor türleri [10]

Song ve Edwards HCCI motorunun düşük yük çalışma sınırını arttırmak amacıyla negatif supap bindirmesi yöntemini çalışmışlardır. Sıkıştırma oranı, pilot enjeksiyon zamanlaması ve pilot enjeksiyon miktarının optimize edilmesi üzerine deneysel çalışmalar yapmışlardır. Sıkıştırma oranı optimum değeriyle düşük yük çalışma bölgesi genişleyebileceğini tespit etmişlerdir. Daha yüksek sıkıştırma oranı, daha ileri ana yanma zamanlaması ile sonuçlanır ve daha stabil yanma getirir. Pilot enjeksiyon zamanlaması değişimi ise daha iyi kontrol edilebilirlik sağladığını görmüşlerdir. Çalışmalarında, eşdeğerlik oranı 0.95, negatif valf üst üste binmesi sırasında oksijen eksikliğinden kaynaklanan en sınırlı düşük yük operasyonunu gösterirken, 0.85 eşdeğerlik oranı ise test edilen üç eşdeğerlik oranı arasında en geniş düşük yük çalışma aralığını göstermiştir [11]. Çınar ve Uyumaz, benzinli HCCI bir motor için kam tasarımı ve üretimi üzerine çalışmışlardır. HCCI yanma karakteristiğine uygun olarak, 124 derece açık kalma süresi ve 3.5-7.5 arasında kalkma yüksekliğine sahip kamlar tasarlanmışlardır. Kam geometrik modelleri, dairesel yay eğrisi kullanılarak, fourier serisi ile ekstrapole ile

eşitlikler kurularak çıkartılmıştır. Kullandıkları yöntem, klasik spline fonksiyonları ile üretilen kam profiline kıyasla, yüksek supap kalkma miktarlarında bile, kamın iticiye tek noktadan temas özelliğini yitirmediği tespit edilirken, sürtünme ve atalet kuvvetlerinin azaldığı görülmüştür [12]. Ma ve diğ. HCCI motoru için çok amaçlı evrimsel algoritma tabanlı optimizasyon çalışması yürütmüşlerdir. HCCI motorunun optimizasyon performansı, HCCI motoru Simulink modeli ve Pareto Evrimsel Algoritma (SPEA2) yöntemleri ile temsil edilmiştir. Motor, 1500-2250 rpm hızlar ve 3-4.5 arası indike basınçlar ile doğrulanmıştır. Model, HCCI motorunun belirtilen özgül yakıt tüketimini ve HC emisyonlarını iyi bir doğrulukla simüle edebilecek kapasitededir. HCCI motorunun emme supabı açılma zamanlaması, egzoz supabı kapatma zamanlaması ve hava-yakıt oranı motorun aktüatör ayarlarını oluşturur. Yaptıkları deneysel ve simülasyon yöntemleri göstermektedir ki, çok amaçlı evrimsel algoritma HCCI motorun aktüatörünün optimum değerlerini tespit edebilmektedir. Bunu çok hızlı ve yüksek doğrulukta gerçekleştirebilmektedir [13]. Hunicz ve diğ. değişken supap zamanlaması ve değişken supap bindirmesiyle yakıt verimliliği sağlayan, bir HCCI motor geliştirmeyi amaçlamışlardır. Tasarlanan motorun, yüksek yük aralıklarında çalışabileceği ön görülmüştür. Araştırmalarında, motorda egzoz supap zamanlaması geciktirmesi, dolgu basıncı ayarlaması ve kullanılan yakıtın azaltılması yöntemlerini denemişlerdir. Supap zamanlamasının geciktirilmesi iyi bir çözüm olduğunu rapor etmişlerdir. Yakıtın %50 yandığı hacim ve yanma süresi iki kritik değişken olarak, kontrol için kullanılacak parametreler olduğunu tespit etmişlerdir [14].

Yukarıda sunulan literatür çalışmasından da anlaşılacağı üzere, HCCI motorlar yüksek verimleri ve düşük emisyon değerleri dolayısıyla büyük gelecek vaat etmektedirler. Ancak bu tür motorların hava-yakıt oranı ve supap zamanlamaları iyi bir şekilde kontrol edilmelidir ki; vuruntu, gürültü ve tekleme gibi olumsuz durumlar olmadan motor stabil olarak çalışabilmelidirler. Bunun için, bir boyutlu yanma modelleri kullanılarak, motorun bütünsel, gerçekçi modelini oluşturularak, çok amaçlı genetik algoritma yöntemiyle HCCI motor parametreleri optimize edilmelidir. Bu yöntem ile deneysel çalışma ile çok mümkün olamayacak, yüzlerce farklı kombinasyon üretilip, simüle edilerek, sonuçlar arasından en uygun sonuç seçilebilecektir.

II. MATERYAL VE METOT

Test motoru olarak, Caterpillar® SCOTE 3401 motoru kullanılmıştır. Test motoru, tek silindirli ve 2.44 litre hacme sahiptir (Tablo 1). Homojen dolgulu sıkıştırma ateşlemeli prensibi ile çalışarak, yakıt olarak dizel kullanılmaktadır. Bu motor bütün parametreleri ile, supaplar, enjektör ve silindirle beraber bir boyutlu olarak, GT-Suite programı kullanılarak modellenmiştir

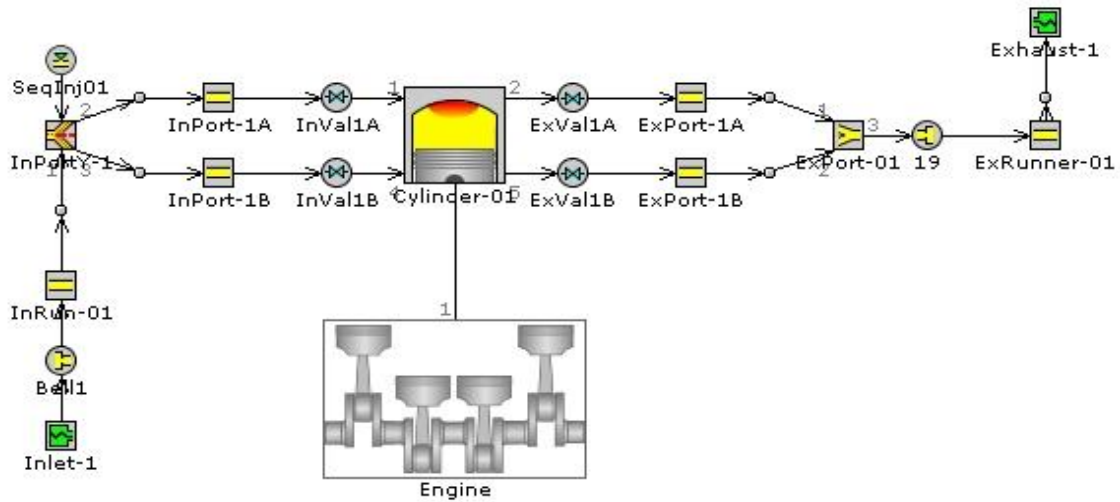
[15]. Yakıt enjeksiyonu, emme safhası sırasında, port enjeksiyon olarak çalışmaktadır (şekil 2). Motorda 2 emme ve 2 egzoz olmak üzere, 4 supap bulunmaktadır. Modelde, HCCI yanma için geliştirilen, reaksiyon mekanizması, silindir içi yanmayı modellemek için kullanılmıştır [16]. Kullanılan reaksiyon mekanizması 29 tür ve 52 reaksiyon içermektedir ve deneysel sonuçlarla doğrulanmıştır.

Test motorunun kurulan gerçekçi bir boyutlu modeliyle, optimizasyon çalışması gerçekleştirilmiştir. Optimize edilmesi amaçlanan egzoz ve emme supap profilleri, HCCI yanma için en iyi duruma getirilecektir. Bunun için, en gelişmiş ve güçlü yöntem olan genetik algoritma yöntemi tercih edilmiştir. Birçok bağımsız değişkenden, bir veya birden fazla kısıtlamanın varlığından ve doğrusal olmayan özelliklerden kaynaklanabilecek, orta ve yüksek karmaşıklığa sahip tüm problemler için tavsiye edilen bir yöntemdir. Java bazlı çoklu amaçlı evrimsel algoritma çerçevesinde NSGA-III genetik algoritma yöntemi çalışmanın optimizasyon kısmında

kullanılmıştır [17,18]. Şekil 3 yöntemin çalışmasını şematik olarak göstermektedir.

Tablo 1. Test motorunun özellikleri

Çap / Strok [mm]	137.2 / 165.1
Biyel kolu uzunluğu [mm]	261.6
Silindir hacmi [l]	2.44
Silindir sayısı	1
Sıkıştırma oranı	16.1
Emme supabı kapanma [° KA]	-115
Egzoz supabı açılma [° KA]	+139
Emme supabı açılma [° KA]	+342
Egzoz supabı kapanma [° KA]	+400

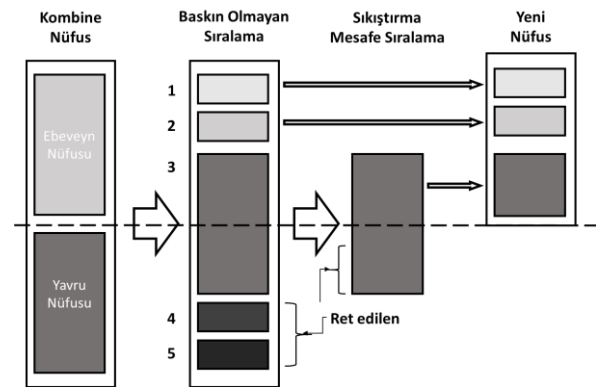


Şekil 2. Homojen dolgu sıkıştırma ateşlemeli motorun bir boyutlu GT-Suite modeli

Motorun emme supabı açılma zamanlaması, egzoz supabı açılma zamanlaması, egzoz supabı bekleme süresi, emme supabı bekleme süresi, volümetrik verimi ve fren gücünü maksimize etmek üzere optimize edilmiştir. Emme supabı açılma zamanlaması için 190 derece ile 250 derece arasında, egzoz supabı açılma zamanlaması için ise 90 derece ile 160 derece arasında oldukça geniş aralıkta en uygun zaman tespit edilmeye çalışılmıştır. Ayrıca egzoz ve emme supabı bekleme süresi olarak 1 derece ile 10 derece arası bir aralık taranmıştır. Değişkenler birbirine bağımlı olarak düşünülmüştür.

Genetik algoritma yönteminde, popülasyon sayısı 20 ve nesil sayısı 16 olarak belirlenmiştir. Sonuca ulaşmak için toplamda 320 iterasyon yapılmıştır. İterasyonlar ilerlerken ortalama indike basınç (OİB), silindir içi maksimum basınç, verim, yakıtın yanma süresi, özgül

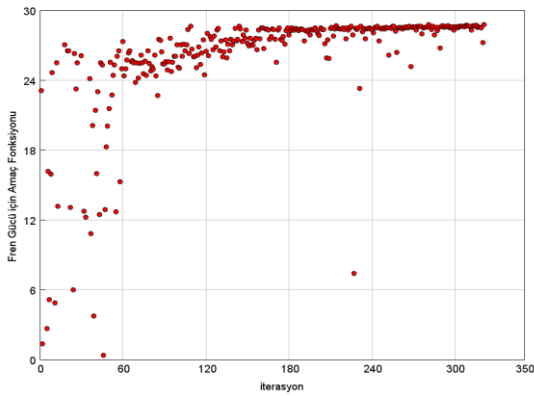
yakıt tüketimi (ÖYT), tork ve güç gibi motor parametreleri kontrol edilmiştir.



Şekil 3. NSGA Genetik algoritma yönteminin şematik gösterimi

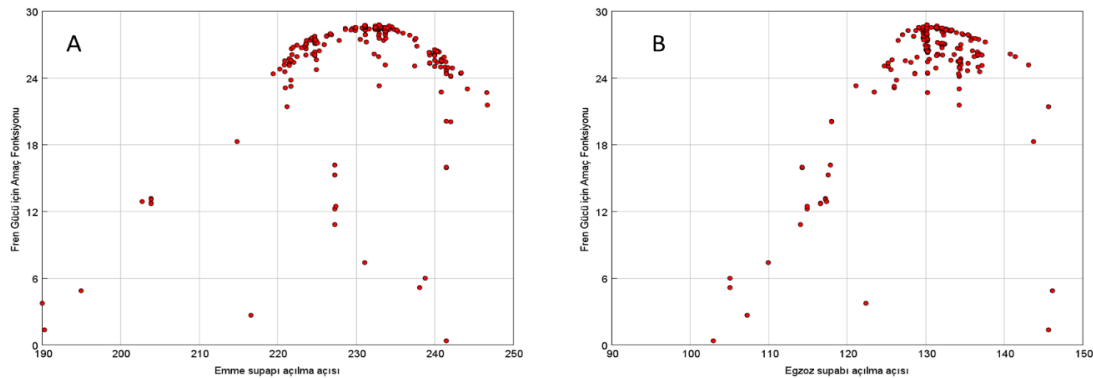
III. BULGULAR VE TARTIŞMA

Homojen dolgulu sıkıştırma ateşlemeli motorlarda yanmanın kontrol edilmesi kritik önem taşımaktadır. Bunun için en uygun karışım teşkili supapların en doğru zamanlarda açılıp kapanması ve eğrinin karakteristiğine bağlıdır. Çünkü yakıt enjeksiyonu emme zamanında gerçekleşerek, supaplar vasıtasıyla karışım silindir içine alınmaktadır. Dolayısıyla en yüksek volümetrik verim elde etmek ve en yüksek güç değerini ve en düşük ÖYT değerini elde etmek için optimizasyon çalışması yürütülmüştür. Bu çalışmalarda toplam 321 farklı durum genetik algoritma yöntemi ile türetilmiş ve model ile çözülmüştür. Çözülen iterasyonlara bağlı fren gücü amaç fonksiyonunun değişimi şekil 4'te görülmektedir. İterasyonlar ilerlerken, farklı parametreler denenerek, yaklaşık 180 civarı iterasyonda maksimum gücü verecek parametreler elde edildiği görülmektedir.



Şekil 4. Fren gücü amaç fonksiyonunun iterasyonlara bağlı değişimi

Fren gücü amaç fonksiyonunun emme supabı açılma açısı, egzoz supabı açılma açısı, emme supabı bekleme zamanı, egzoz supabı bekleme zamanı değişimine bağlı olarak aldığı değerler şekil 5 ve 6'da verilmiştir. Fren gücü amaç fonksiyonunun en yüksek olduğu aralık değeri, emme supabı açılma açısı 220 ile 240 derece arasında olduğu değerde meydana gelirken, egzoz supabı açılma açısı 125 ile 135 derece arasında meydana gelmektedir (şekil 5). Ayrıca emme supabı bekleme zamanı 1 ile 5 arasında ve egzoz supabı bekleme zamanı 5 ile 8 derece arasında fren gücü amaç



Şekil 5. Fren gücü amaç fonksiyonunun a) emme supabı b) egzoz supabı açılma zamanına bağlı değişimi

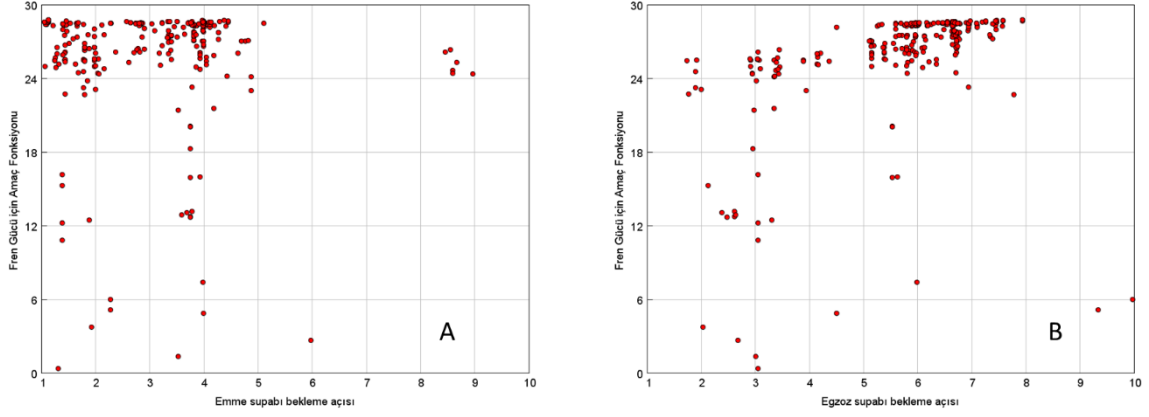
fonksiyonu maksimize olmaktadır (şekil 6). Genetik algoritma bu aralıklarda çözümleri sıkılaştırarak, daha hassas sonuç vermiştir.

Esasen volümetrik verime bağlı olarak güç artışı gerçekleşmiştir. Buna göre şekil 7 ve 8'deki değerler motor gücü ile doğru orantılıdır. Emme supabı 230 derece açılma açısı civarında ve egzoz supabı 130 derece civarında, volümetrik verim %85'in üzerine çıkmaktadır.

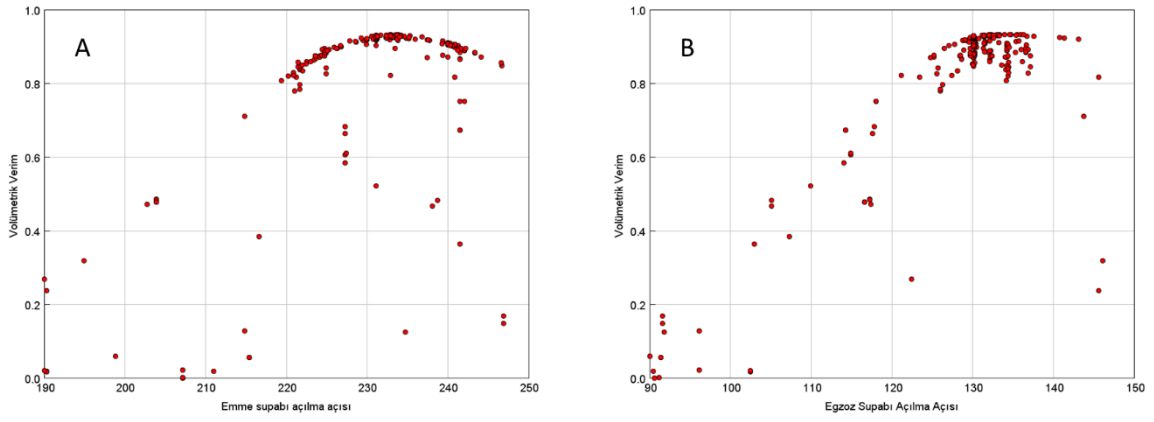
Volümetrik verim, emme supabı bekleme zamanı 1 ile 4 derece arasında ve egzoz supabı bekleme zamanı 5 ile 8 derece arasında maksimum değeri almaktadır (şekil 8). Bu kritik değer üstünde volümetrik verim oldukça düşmektedir. Aynı zamanda bekleme zamanları ile emme ve egzoz açılma kapanma zamanları da genetik algoritma tarafından değiştirildiğinden, birbirlerine bağlı etkileri de görülmektedir. Dolayısıyla, bekleme açıları supap bindirmesini uzatabilmektedir ve alınan taze havanın egzozdan atılması meydana gelebilir. Böylelikle optimum değer bütün değerlerin kombinasyonu olarak seçilmektedir. Kullanılan yöntem buna izin vermektedir.

HCCI yanma stratejisinde, emme supabı daha az bekleme zamanına ihtiyaç duyarken, egzoz supabı için bu değer daha uzun olması volümetrik verimi maksimize etmektedir. Optimum değer seçilirken egzoz supabına daha uzun bekleme süresi eklenmiştir.

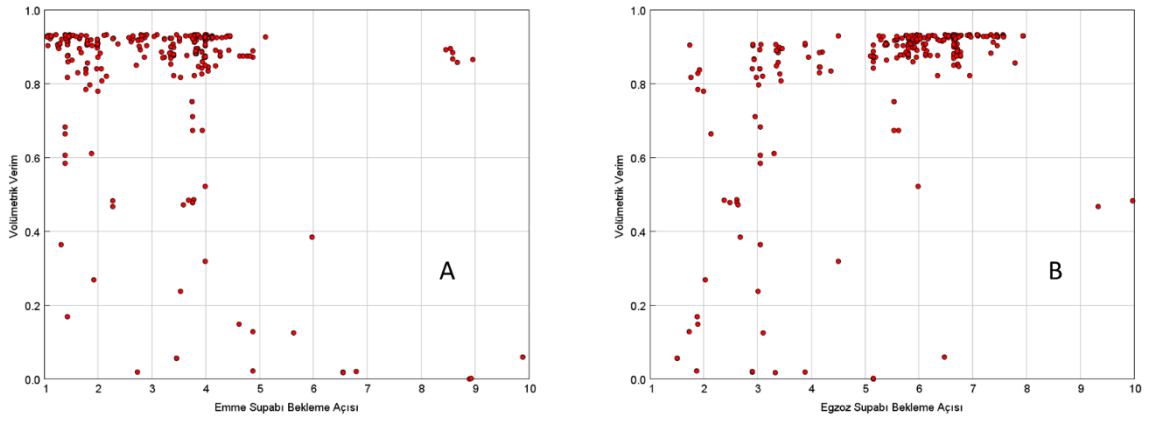
Volümetrik verim artışı ve fren gücü artışı ile özgül yakıt tüketimi değeri minimize olmaktadır (şekil 9 ve 10). Emme supabı açılma açısı, egzoz supabı açılma açısı, emme supabı bekleme zamanı, egzoz supabı bekleme zamanı volümetrik verimin ve fren gücünün maksimize olduğu aralıkta ÖYT değeri minimize olmaktadır. Benzer durum motor tork değeri için de geçerlidir. Tork değeri güç ile orantılı olarak, girilen parametrelere bağlı olarak maksimum değeri almaktadır (şekil 11 ve 12). Bu durum parametre seçim işimizi kolaylaştırmaktadır. Amacımızı oluşturan, güç, tork ve volümetrik verimin maksimize edilmesi, ÖYT değerinin minimize edilmesi; benzer girdi parametreleri ile sağlanmaktadır.



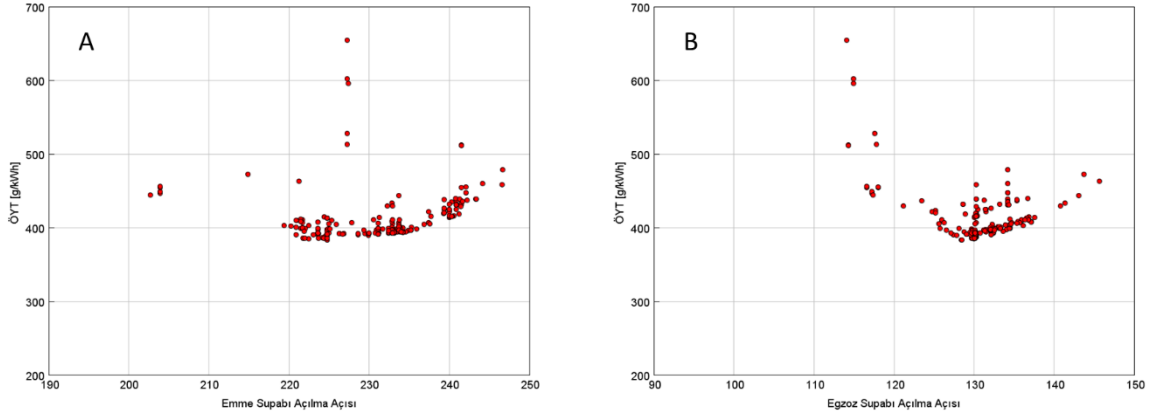
Şekil 6. Fren gücü amaç fonksiyonunun a) emme supabı b) egzoz supabı bekleme açısına bağlı değişimi



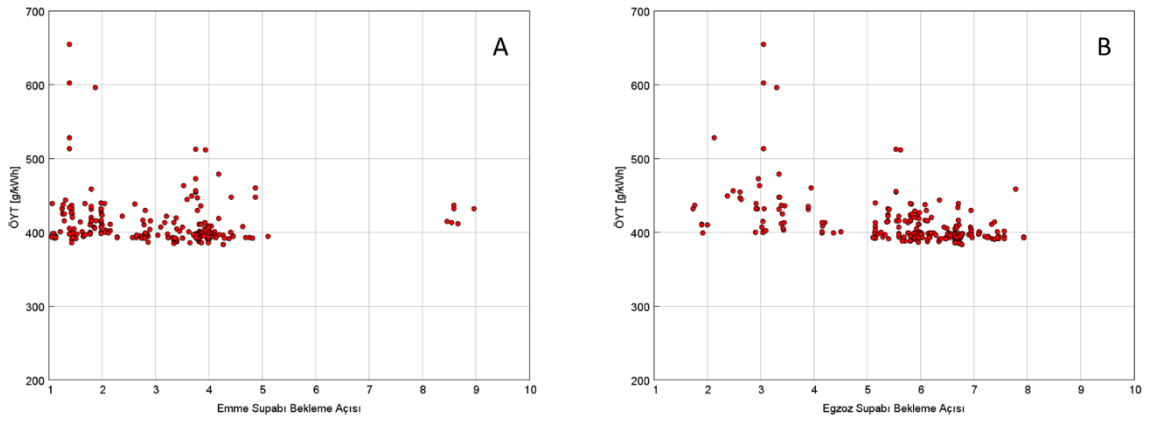
Şekil 7. Volümetrik verimin a) emme supabı b) egzoz supabı açılma zamanına bağlı değişimi



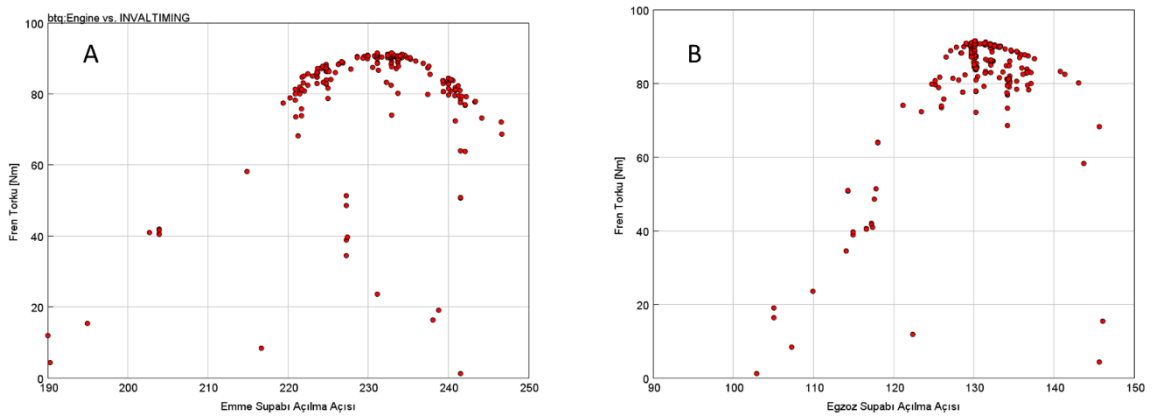
Şekil 8. Volümetrik verimin a) emme supabı b) egzoz supabı bekleme açısına bağlı değişimi



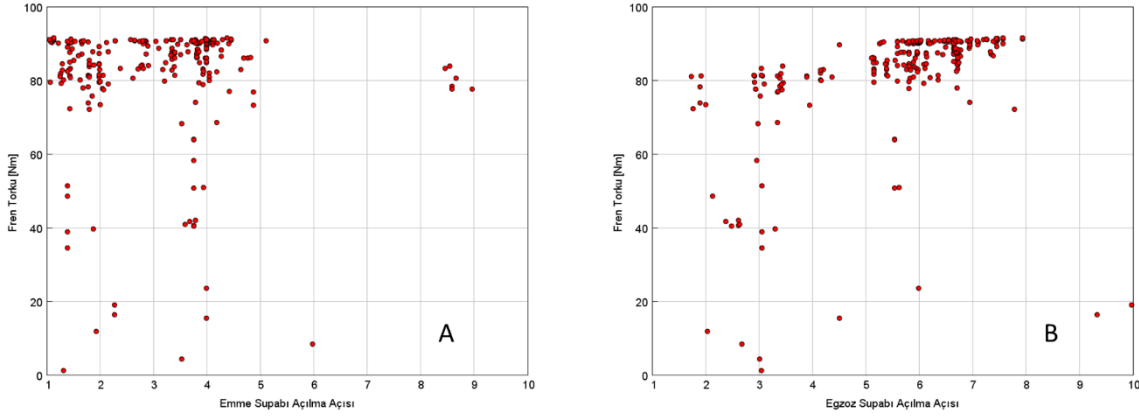
Şekil 9. ÖYT değerinin a) emme supabı b) egzoz supabı açılma zamanına bağlı değişimi



Şekil 10. ÖYT değerinin a) emme supabı b) egzoz supabı bekleme açısına bağlı değişimi

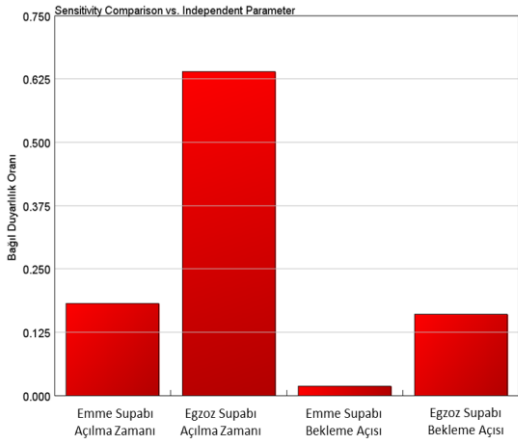


Şekil 11. Fren tork değerinin a) emme supabı b) egzoz supabı açılma zamanına bağlı değişimi



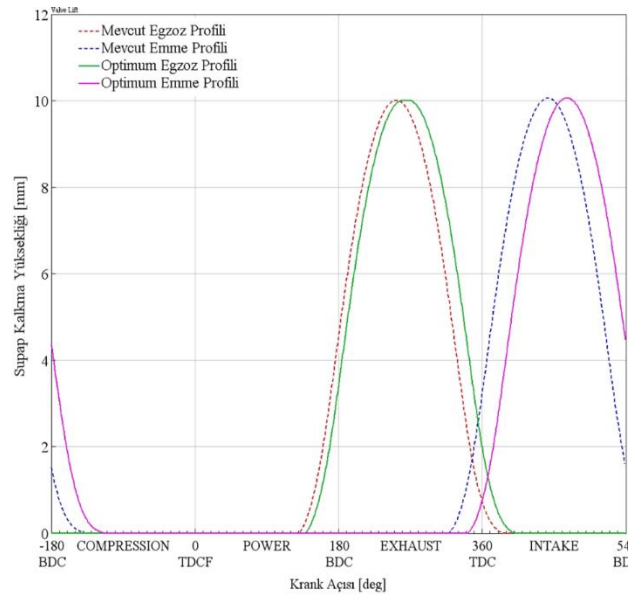
Şekil 12. Fren tork değerinin a) emme supabı b) egzoz supabı bekleme açısına bağlı değişimi

Optimizasyon için seçilen emme supabı açılma açısı, egzoz supabı açılma açısı, emme supabı bekleme zamanı, egzoz supabı bekleme zamanı parametreleri farklı duyarlılık oranı ile amaç fonksiyonuna etki etmektedir (şekil 13). Egzoz supabı açılma açısı, %63 gibi bir oranla amaç fonksiyonuna büyük oranda etki eden parametreyken, emme supabı bekleme zamanı amaç fonksiyonuna %2'lik gibi az bir oranda etki etmektedir.



Şekil 13. Optimizasyon parametrelerinin bağlı duyarlılık oranı

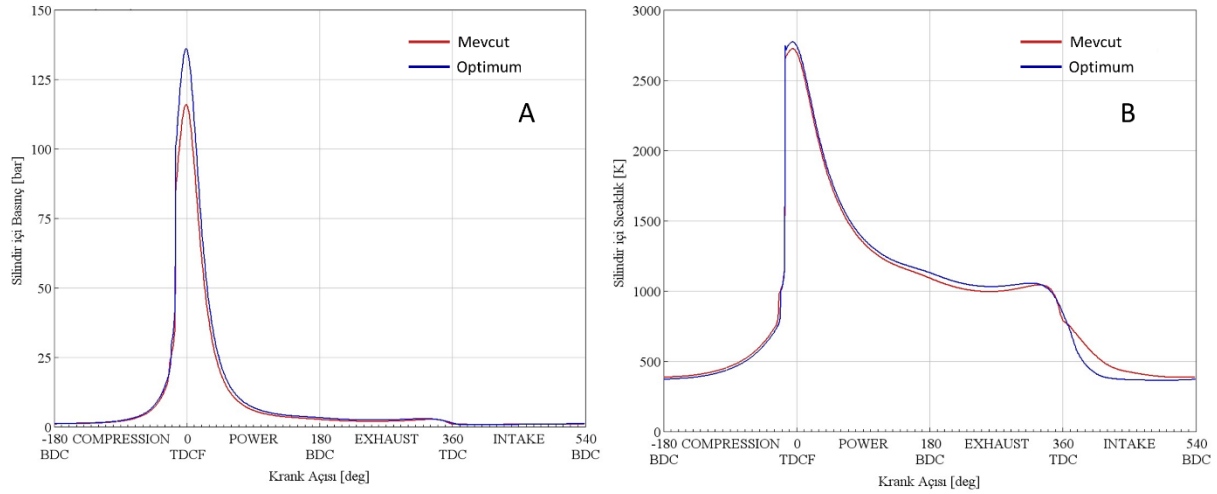
Gerçekleştirilen optimizasyon çalışmasıyla, optimum emme ve egzoz profili ortaya çıkmıştır. Emme supabı açılma açısı 221 derece, egzoz supabı açılma açısı 130 derece, emme supabı bekleme zamanı 1 derece, egzoz supabı bekleme zamanı 8 derece olarak seçilmiştir. Buna göre oluşan optimum emme ve egzoz supap profili, mevcutla mukayeseli olarak şekil 14'te verilmiştir. Kesikli çizgiler mevcut supap zamanlarını gösterirken, kesintisiz çizgiler optimize edilmiş supap profilini göstermektedir. Optimum durumda supap açık kalma süreleri uzamıştır ve açılma-kapanma zamanları grafikte sağa kaymıştır. Ayrıca optimum durumda supap bindirmesi daha azdır.



Şekil 14. Mevcut ve Optimum durumda supap profilleri

Mevcut ve Optimum durumda silindir içi basınç ve sıcaklık değerleri şekil 15'te gösterilmektedir. Optimum supap profiliyle oluşan silindir içi basınç ve sıcaklık yükselmektedir. Bu durum istenilen bir durum olmamakla birlikte, hava-yakıt oranı kontrolüyle bu değerler düşürülebilir. Ayrıca optimum durumdaki %28.4 değerindeki güç artışı çok önemli bir sonuçtur. Aynı gücü verecek şekilde hava-yakıt karışımı ayarlanırsa silindir içi basınç ve sıcaklık da düşecektir.

Optimum supap profili ile güç ve tork değerinde %28.4'lük artış gerçekleşmiştir, fren gücü 28.9 kW'a çıkarken, Fren torku 92.1 Nm'ye yükselmiştir. Ayrıca ÖYT değeri %6 oranında azaldığı tespit edilmiştir. Yeni supap profili, hava dolgusunu oldukça verimli gerçekleştirdiği, %21.2'lik volümetrik artışla görülmektedir (Tablo 2).



Şekil 15. Mevcut ve Optimum durumda silindir içi a) basınç ve b) sıcaklık değerleri

Tablo 2. Optimizasyon sonrası motor performans değerlerindeki değişim

	Mevcut	Optimum	Yüzde değişim
Fren Gücü [kW]	22.5	28.9	28.4%
Fren Torku [Nm]	71.7	92.1	28.4%
OEB [bar]	6.17	7.34	19.0%
ÖYT [g/kWsa]	414.3	389.5	-6.0%
Volümetrik verim [%]	71.2	86.3	21.2%
Hava-yakıt oranı	19.6	19.6	0.0%
Fren verimi [%]	19.3	20.6	6.7%
Emme basıncı [bar]	1.005	1.001	-0.4%
Emme sıcaklığı [K]	362	322	-11.0%
Egzoz basıncı [bar]	1.185	1.278	7.8%
Egzoz sıcaklığı [K]	989	1009	2.0%

IV. SONUÇ VE ÖNERİLER

Homojen dolgu sıkıştırma ateşlemeli motorlar yüksek verimi ve düşük egzoz emisyonlarıyla içten yanmalı motorların kullanımına önemli bir katkı sağlayacağı düşünülmektedir. Bu tür motorların geniş devir ve yük aralığında çalışması için motor parametrelerinin optimize edilmesi gerekmektedir. Bu çalışmada HCCI türü motorlar için, en uygun profilin tasarlanması ve uygun metodolojinin geliştirilmesi amaçlanmıştır. Motorun gerçekçi bir modeli oluşturularak, değişen supap parametrelerine göre, performans değerlerindeki değişim gözlemlenmiştir. NSGA-III genetik algoritma kodu ile 320 farklı parametre kombinasyonu oluşturularak ve GT-Suite modeliyle simüle edilerek, amaç fonksiyonunu maksimize eden, en uygun parametreler elde edilmiştir. Uygun supap profiliyle %20'den fazla volümetrik verim artışı gözlemlenmektedir. Güç, tork değerleri de %28 civarında artarak, ÖYT değerinde %6 azalma gözlemlenmiştir. Dolayısıyla bu tür motorların daha

verimli ve sorunsuz çalışabilmesi için en uygun profilin oluşturulması kritik öneme sahiptir.

Gelecek çalışmalarda, bulunan en uygun supap profili kullanılarak, farklı devir ve yük aralığında çalışmalar yapılacaktır. Farklı devir ve yükler için, supap profili optimizasyonu yapılarak geniş çalışma aralığında değişken supap profilleriyle maksimum verimle çalışma sağlanacaktır. Ayrıca sıkıştırma oranı gibi motor parametreleri için optimum değerler bulunmalıdır. Sadece verimi arttırmak için değil aynı zamanda vuruntusuz ve gürültüsüz çalışması da önemlidir. Bunun için optimum sonuçlar için basınç artış oranı ve maksimum basıncın olduğu krank açıları da göz önüne alınmalıdır. Bu sonuçlar, CFD ve deneysel yöntemlerle tekrar gözden geçirilerek, HCCI motorun geniş bir aralıkta optimum çalışma şartlarında çalışması garanti edilmelidir. Böylelikle HCCI stratejisinden en yüksek verimle faydalanılabilecektir.

KAYNAKLAR

- [1] Nilsen CW., Biles DE., & Mueller CJ., (2019). Using Ducted Fuel Injection to Attenuate Soot Formation in a Mixing-Controlled Compression Ignition Engine. *SAE International Journal of Engines*, 12(3), 309–322.
- [2] Sener R., Yangaz MU., & Gul MZ., (2020). Effects of injection strategy and combustion chamber modification on a single-cylinder diesel engine. *Fuel*, 266, 117122.
- [3] Chen Y., Li X., Li X., Zhao W., & Liu F., (2019). The wall-flow-guided and interferential interactions of the lateral swirl combustion system for improving the fuel/air mixing and combustion performance in DI diesel engines. *Energy*, 166(1), 690–700.
- [4] Chaudhari VD., & Deshmukh D., (2020). Diesel and diesel-gasoline fuelled premixed low temperature combustion (LTC) engine mode for clean combustion. *Fuel*, 266, 116982.
- [5] Koten H., & Gül Z., (2014). Multidimensional Modeling of Compressed Biogas Engine for Ultra Low Emission. *Marmara Fen Bilimleri Dergisi*, 26(2), 41–49.
- [6] Sayın C., Şenbahçe A., & Temür M., (2014). Alkol Yakıtların Buji Ateşlemeli Motorlarda Kullanımının Performans ve Emisyonlara Etkisinin İncelenmesi. *Marmara Fen Bilimleri Dergisi*, 26(1), 20–29.
- [7] Anarghya A., Rao N., Nayak N., Tirpude AR., Harshith DN., & Samarth BR., (2018). Optimized ANN-GA and experimental analysis of the performance and combustion characteristics of HCCI engine. *Applied Thermal Engineering*, 132(1), 841–868.
- [8] Fiveland SB., & Assanis DN., (2000). A four-stroke homogeneous charge compression ignition engine simulation for combustion and performance studies. *SAE transactions*, 109(3), 452–468.
- [9] Tian G., Wang Z., Ge Q., Wang J., & Shuai S., (2007). Mode switch of SI-HCCI combustion on a GDI engine. *SAE Technical Paper*, 195(1).
- [10] Hairuddin AA., Wandel AP., & Yusaf T., (2014). An Introduction to a Homogeneous Charge Compression Ignition Engine. *Journal of Mechanical Engineering and Sciences*, 7(1), 1042–1052.
- [11] Song HH., & Edwards CF., (2008). Optimization of recompression reaction for low-load operation of residual-effected HCCI. *SAE Technical Papers*, 16(1), 776–790.
- [12] Çinar C., & Uyumaz A., (2014). Homojen Dolgulu Sıkıştırma ile Ateşlemeli Bir Benzin Motoru için Kam Tasarımı ve İmalatı. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 29(1), 15–22.
- [13] Ma H., Xu H., Wang J., Schnier T., Neaves B., & Tan C., (2015). Model-Based Multiobjective Evolutionary Algorithm Optimization for HCCI Engines. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 64(9), 4326–4331.
- [14] Hunicz J., Mikulski M., Geca MS., & Rybak A., (2020). An applicable approach to mitigate pressure rise rate in an HCCI engine with negative valve overlap. *Applied Energy*, 257(1), 1–14.
- [15] Gamma Technologies. (2016) GT-Suite Engine Performance Application Manual. Westmont, USA: Gamma Technologies.
- [16] Patel A., Kong SC., & Reitz RD., (2004). Development and validation of a reduced reaction mechanism for HCCI engine simulations. *SAE Technical Paper*, 558(1).
- [17] Hadka D., & Reed P., (2015). Large-scale parallelization of the Borg multiobjective evolutionary algorithm to enhance the management of complex environmental systems. *Environmental Modelling & Software*, 69(1), 353–369.
- [18] Deb K., & Jain H., (2014). An Evolutionary Many-Objective Optimization Algorithm Using Reference-Point-Based Nondominated Sorting Approach, Part I: Solving Problems with Box Constraints. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 18(1), 577–601.