



Biyodizel Pilot Püskürtmeli Doğalgaz Yakıtıyla Çalışan Bir Dizel Motorda Silindir Basıncı Değişiminin Stokastik Reaktör Model Kullanılarak İncelenmesi

Enes Fatih PEHLİVAN¹, İsmail ALTIN²

¹Ordu Üniversitesi, Fatsa Deniz Bilimleri Fakültesi, Türkiye, enesfatih91@gmail.com

²Karadeniz Teknik Üniversitesi, Sürmene Deniz Bilimleri Fakültesi, Türkiye, ismail.altin@gmail.com

Öz

Denizcilik sektöründe enerjinin ekonomik ve ekolojik özelliklerini dikkate alan gemi makinelerinin üretilmesi için yapılan çalışmalardan birisi de çift yakıtlı motorlardır. Çift yakıtlı motorlarda, yanma odasındaki gaz yakıt-hava karışımı pilot yakıtla tutuşturulur. Bu motorlar çoğunlukla dizel motorların dönüştürülmesiyle üretilirler. Yanma karakteristikleri; genellikle basınç, ısı salınım oranı ve tutuşma gecikmesini kapsamaktadır. Bu karakteristikler, deneysel ölçümlerle ve teorik yaklaşımlarla elde edilmektedir. Kullanılan teorik yaklaşımlardan birisi de 0-boyutlu Stokastik Reaktör Model yaklaşımıdır. Bu yaklaşım, olasılık yoğunluk fonksiyonuyla sıkıştırma, yanma ve genişleme işlemlerini analiz eder. Bu yaklaşıma dayalı bir motor simülasyon yazılımı geliştirilmiştir ve yakıtların detaylı ve indirgenmiş kimyasal kinetik mekanizmalarıyla çalışmaktadır. Bu çalışmada, biyodizel pilot yakıtı ve doğalgaz gaz yakıtıyla çalışan çift yakıtlı motor en uygun iki pilot püskürtme parametresi ve farklı stokastik parçacık sayılarında simüle edilmiştir. Modelin geçerliliğini göstermek için bu motor üzerinde yapılan çalışmadan yararlanılmıştır. En uygun pilot püskürtme parametrelerinde simülasyon ve deneysel basınç değerlerinin belirli hata oranlarında uyumlu olduğu gözlemlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Gemi Makineleri, Biyodizel Pilot Püskürtmeli Doğalgaz Yakıtıyla Çalışan Dizel Motorlar, Stokastik Reaktör Model, Olasılık Yoğunluk Fonksiyonu.

Investigation of Cylinder Pressure Variation Using Stochastic Reactor Model in a Biodiesel Pilot Injection Diesel Engine Operated with Natural Gas

Abstract

In maritime sector one of the studies made in order to produce ship engines which consider economic and ecologic properties of energy is dual fuel engines. In dual fuel engines, gas fuel-air mixture is ignited with pilot fuel in the combustion chamber. These engines are mostly produced by transforming diesel engines. Combustion characteristics typically include cylinder pressure, heat release rate and ignition delay. These characteristics are acquired through experimental measurements and theoretical approaches. One of the theoretical approaches used is zero dimensional Stochastic Reactor Model. This approach analyzes compression, combustion and expansion processes using probability density function. An engine simulation software based on this approach has been developed and operates by using detailed and reduced chemical kinetic mechanisms of fuels. In this study, the dual fuel engine operated with biodiesel as a pilot fuel and natural gas as a gas fuel was simulated in two optimum pilot injection parameters and different stochastic particle numbers. It has drawn on the study performed on this engine to show the validity of the model. In the most proper pilot injection parameters, it was observed that simulation and experimental pressure values are compatible with each other in specific error rates.

Keywords: Marine Engines, Stochastic Reactor Model, Biodiesel Pilot Injection Diesel Engine operated with Natural Gas, Probability Density Function.

1. Giriş

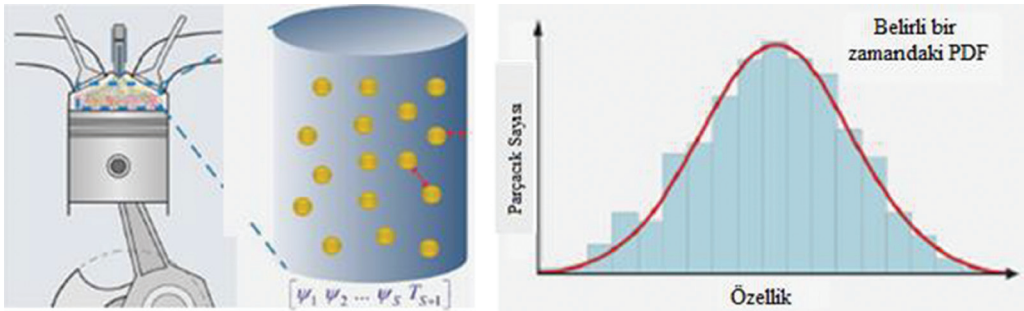
Günümüzde birçok alanda olduğu gibi denizcilik sektöründe de enerjinin kullanımı konusunda ekonomik ve ekolojik bakış açısı ile değerlendirmelerin yapılması ve buna uygun adımların atılması gerektiği konusunda güçlü bir fikir birliği oluşmuştur. Enerjinin ekonomik olması enerji üretiminin maliyeti ile ilgili iken, enerjinin ekolojik olması çevre üzerinde bıraktığı olumsuz izlerin en düşük düzeyde tutulmaya çalışılması şeklinde ifade edilmektedir [1]. Denizcilik sektöründe ekonomik ve ekolojik özellikleri içerisinde barındıran enerji kaynaklarının uygun şekilde adaptasyonu için gemi makineleri üzerinde çeşitli araştırmalar yapılmaktadır. Bu bağlamda, çift yakıtlı motor sistemleri önemli seçeneklerden biri olarak ön plana çıkmaktadır [2, 3]. Çift yakıtlı motor sistemleri; iki farklı yakıtın (gaz yakıt + sıvı yakıt) yanma odası içerisinde birlikte yakılması prensibine dayanmaktadır. Yakıt karışımı çeşitli pilot sıvı yakıtlar (dizel, biyodizel vb.) kullanılarak tutuşturulmaktadır. Çift yakıtlı motorlar; ilk etapta dizel motorlarına ilave donanımlar (ateşleme sistemi) eklenmesi veya mevcut donanımların (yakıt püskürtme sisteminin) çalışma ayarlarının değiştirilmesi ile gerçekleşen bir dönüştürme işlemi sonucunda elde edilmektedir. Mevcut durumda önemli gemi makine üreticileri hem gaz yakıt hem de dizel yakıtı ile çalışma özelliğine sahip makinelerini yeni gemi inşa uygulamalarında kullanıma sunmaktadırlar. Genel olarak bakıldığında ilk aşamada dönüştürme yolu ile hayata geçirilen çift yakıtlı motorların daha ekonomik bir seçenek olduğu söylenebilir. Bu tip motorlarda çeşitli gazlar (biyogaz, hava gazı, hidrojen vb.) gaz yakıt olarak kullanılmış olmasına rağmen, doğalgazın yüksek kendiliğinden tutuşma sıcaklığına (yüksek vuruntu dayanımına) sahip olması ve tedarikinin daha kolay olmasından dolayı tercih edilmektedir. Diğer taraftan,

doğalgazın karbon-hidrojen (C/H) oranı diğer hidrokarbon yakıtlara göre oldukça düşük bir değere sahip olması, karbondioksit emisyonu salımı miktarının düşük seviyelerde gerçekleşmesini sağlamaktadır. Doğalgazın düşük C/H oranı, güncel egzoz emisyon kısıtlamalarını karşılama potansiyeline sahip olduğunu açıkça göstermektedir [4]. Çift yakıtlı motorlarda pilot yakıt olarak saf dizel [5, 7], dizel-etanol karışımları [8, 9] ve dimetil eter (DME)[10, 11] kullanımı ile ilgili literatürde çeşitli çalışmalar bulunmaktadır. Yukarıda sıralanan pilot yakıt seçeneklerinden özellikle dizel yakıtı fosil kaynaklara dayalıdır ve zamanla tükenme tehlikesi ile karşı karşıyadır. Bu olumsuz durum, pilot yakıt olarak alternatif yakıtların kullanımı ile ilgili çalışmaları teşvik etmiştir. Biyodizel, yakıt özellikleri ile dizel yakıtına çok benzer özelliklere sahiptir ve çift yakıtlı motorlarda çok büyük değişikliklere gidilmeksizin kullanımında bir sakınca bulunmamaktadır [12]. Biyodizel, bitkisel ve hayvansal yağların esterleşme reaksiyonları sonucunda elde edilmektedir. Kimyasal yapısındaki oksijen ve dizel yakıtına göre daha yüksek setan sayısına sahip olması biyodizelin önemli üstünlükleri arasında sayılabilir. Bu avantajlarına karşın, biyodizelin özgül ağırlığı ve kinematik viskozitesi dizel yakıtına göre daha yüksek ve alt ısıl değeri ise daha düşüktür. Bunun sonucunda dizel motorlarında saf veya karışım yakıt şeklinde biyodizel kullanımı özgül yakıt tüketiminin artmasına neden olmaktadır. Biyodizelin pilot yakıt olarak kullanılması sırasında bu olumsuz durumlara pek rastlanmamaktadır. Çünkü yanma işlemi gaz yakıt ana yakıttır ve biyodizel pilot yakıtı sadece tutuşmayı sağlayacak minimum miktarda kullanılmaktadır. İçeriğindeki oksijen sayesinde; is, HC ve CO emisyonlarını azaltmakta, fakat NO_x emisyonlarını arttırmaktadır [13]. NO_x emisyonlarının artsa bile, sera etkisine

neden olan zararlı gazlar biyodizelin pilot yakıt olarak kullanılmasıyla azalacak ve bunun sonucunda çevre dostu motorların önemi artacaktır [13, 18]. Çift yakıtlı motor sistemleri dizel motora göre daha düşük performans karakteristiklerine sahiptir. Bunun nedeni silindir içerisindeki oksijen oranının azalması ve yanma işleminin güçleşmesidir. Çift yakıtlı motorlar vb. diğer motor tipleri ile ilgili araştırma faaliyetlerinde kullanılabilir en güçlü araçların başında deneysel yöntemler gelmektedir. Ancak, ekonomiklik ve incelenebilecek parametrelerin sayısı açısından bazı kısıtlamaları içermektedir. Bu bağlamda sayısal akışkanlar dinamiği (CFD) esaslı yazılımlar büyük esneklik sağlamaktadır. CFD çalışmaları özellikle üç boyutlu (3D) çalışmalarda önemli hesap yükünü beraberinde getirmektedir. Bu noktada, hesap yükü daha az ve sağlıklı sonuçlar veren yazılım araçlarına gereksinim duyulmuştur. Bu kapsamda, 0-Boyutlu Stokastik Reaktör Model (SRM) yaklaşımına dayanan "SRM Engine Suite" yazılımı içten yanmalı motorlar ile ilgili araştırmalarda yaygın şekilde kullanılmaya başlanmıştır [19]. Stokastik kelimesinin kelime anlamı 'olasılıksal' olup, bu terim yanma işleminin olasılık dağılım fonksiyonundan rastsal bir örnek seçilen gözlemler dizisinin her birini kapsayan bir sürecin modellenmesini ifade etmektedir. Stokastik dalgalanmalar herhangi bir içten yanmalı motor

çalışmasında meydana gelebilir ve motorda meydana gelen bu dalgalanmalar kurulan modeller aracılığıyla açıklanabilmektedir. SRM Engine Suite yazılımı yanma odası içerisine rastgele bir biçimde dağılan parçacıkların olasılık yoğunluk fonksiyonu aracılığıyla sıkıştırma, yanma ve genişleme olaylarının analizini yapmaktadır. Şekil 1'de gösterildiği gibi rastgele dağılan bir stokastik parçacık sanal olarak bir yakıt-hava paketini temsil etmektedir. Stokastik parçacıkların oluşturduğu topluluk, kimyasal bileşenlerin yapısı ve sıcaklık gibi silindir içi özelliklerin dağılımlarını tahmin etmektedir. Sonrasında, motorda meydana gelen yakıt püskürtme, yanma kinetiği, türbülanslı karışma, piston hareketi ve taşınım ısı kaybı vb. süreçlerin çok boyutlu olasılıksal yoğunluk fonksiyonu üzerindeki etkisi model yardımıyla açıklanabilmekte ve çözümlenmektedir. Stokastik yaklaşım motor silindirindeki sıcaklık ve kimyasal yapının homojensizlik durumlarını incelemektedir [20, 21].

Biyodizel için kimyasal kinetik mekanizmaların gelişimi son yıllarda önem kazanmıştır. Her biyodizelin kendine özgü kimyasal kinetik mekanizması tam olarak geliştirilememiştir. Bu nedenle, belirli kabuller yapılarak bütün biyodizelleri kapsayan genelleştirilmiş, biyodizelin yerini tutan kimyasal kinetik mekanizmaları geliştirilmiş ve geliştirilmeye de devam edilmektedir. İlk olarak, biyodizel kimyasal kinetik mekanizması için metil bütanoat



Şekil 1. Stokastik Parçacıkların Gösterimi ve Olasılık Yoğunluk Fonksiyonu [22].

(C₅H₁₀O₂) kullanımı önerilmiştir [23], ancak yapılan çalışmalarda metil bütanoat'ın tutuşma gecikmesi değerlerinin yüksek olduğu ve tam yanma bileşenlerinin yeterince oluşmadığı gözlemlenmiştir [24, 26]. Bu sorunun çözümü için, metil bütanoatın hacimce 1/3'ü ve n-heptanın (NC₇H₁₆) hacimce 2/3'ü oranında karışımı önerilmiştir [27]. Lawrance Livermore Ulusal Laboratuvarı (LLNL) biyodizelin yerini tutabilecek olan metil dekenoat'ı (C₁₁H₂₂O₂) önermişlerdir. Bunun nedeni, metil dekenoatın karbon zincirinin uzun olması ve bunun sonucunda tutuşma gecikme zamanlarının daha iyi tahmin edilmesi ve tam yanma ürünleri oluşumunun gözlemlenmesidir. Metil dekenoat ile yapılmış çalışmalarda, çift bağların görünümü ve konumunun yakıtın kimyasal yapısı üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu saptanmıştır [26, 27]. Genel olarak biyodizel çeşitli doymamış metil esterler (metil oleat, metil linoleat ve metil linolenat) içermektedir. Bu düşünceden yola çıkılarak, metil dekenoat mekanizması metil-9-dekenoat'ı (C₁₁H₂₀O₂) kapsayacak şekilde genişletilmiş ve n-heptan bileşeni

ve mekanizmalarının eklenmesiyle metil dekenoat/metil-9-dekenoat/n-heptan detaylı kimyasal kinetik mekanizması elde edilmiştir. Bu mekanizma 3299 bileşen ve 12363 reaksiyon içermektedir. Mevcut çalışmalarda büyük molekülü bileşenleri içeren biyodizelin yerini tutan yakıtın kimyasal kinetik mekanizmasının gerçek biyodizel yakıtının tutuşma ve yanma karakteristiklerini iyi bir şekilde temsil edebildiği gözlemlenmiştir [28, 30]. Metil dekenoat, metil-9-dekenoat ve metil-5-dekenoat bileşenlerinin tutuşma gecikme zamanının deneysel olarak karşılaştırılması sonucunda metil-9-dekenoat ve metil dekenoat benzer reaksiyon özelliklerine sahip olmasından dolayı metil-9-dekenoat bileşeninin uygun olmadığı saptanmıştır [31].

1.1. Literatür Özeti

Literatürde biyodizelin pilot yakıt olarak kullanılmasıyla ilgili olarak sınırlı sayıda çalışma bulunmaktadır. Bu bölümde literatürde mevcut olan çalışmaların incelemesi Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Biyodizel Pilot Yakıtlı Çift Yakıtlı Motorlar için Literatür Özeti

Gaz yakıtın türü	Çalışma türü	Değişken	İncelenen parametre	Önemli bulgular	Referans
Hava gazı	Deneysel	Yakıt püskürtme parametreleri	Motor performansı ve egzoz emisyonu	Düşük efektif verim; is, NO _x ve CO ₂ emisyonlarında artma; CO ve HC emisyonlarında azalma	[32, 33]
Biyogaz	Deneysel	Motor yükü ve gaz yakıt akış debisi	Motor performansı ve egzoz emisyonu	Yüksek özgül yakıt tüketimi; yüksek CO ve NO _x emisyonları; düşük efektif verim	[34, 35, 36]
Hidrojen	Deneysel	Emilen hidrojen miktarı	Efektif verim, maksimum silindir basıncı ve ısı açığa çıkış oranı	Efektif verim, ve tutuşma gecikmesi değerlerinde artma; is, HC, CO ve NO _x emisyonlarında azalma; ve kısa yanma süresi	[37]
Hidrojen	Deneysel	Su emülsiyonlu biyodizel kullanımı	Efektif verim ve egzoz emisyonu	Özgül yakıt tüketiminde azalma; Hacimsel verimde azalma; NO _x ve CO ₂ emisyonlarında azalma; Su buharı emisyonunda artma; is, yanmamış HC ve CO emisyonlarının değişmemesi	[38]

./..

Tablo 1. Biyodizel Pilot Yakıtlı Çift Yakıtlı Motorlar için Literatür Özeti (Cont')

Gaz yakıtın türü	Çalışma türü	Değişken	İncelenen parametre	Önemli bulgular	Referans
LPG	Deneysel	Farklı motor yükleri	Motor performansı ve egzoz emisyonu	NO _x emisyonunda artış; CO ve HC emisyonlarında azalma	[39]
Doğal gaz	Deneysel	Farklı miktarda pilot yakıt ve motor yükleri	Motor performansı ve egzoz emisyonu	Dizele göre düşük motor performansı; HC, CO ve NO _x emisyonlarında azalma; çevrim farklılığında azalma	[40, 41]

Tablo 1'den de açıkça görüldüğü gibi, biyodizel pilot yakıtlı çift yakıtlı motorlar konusundaki çalışmalar daha çok yeni ve sınırlı sayıdadır. Tablo 1 incelendiğinde çalışmaların tamamının deneysel esaslı olduğu ve eldeki literatürde teorik temelli bir çalışmanın olmadığı tespit edilmiştir. Teorik çalışmalar için kullanılabilir çok çeşitli yazılım paketleri bulunmaktadır. Bunlardan, Bölüm 1'de gerekçeleri ile tanıtılan stokastik yaklaşım esaslı yazılım birçok çalışmada yaygın bir şekilde kullanılmaktadır.

Stokastik Reaktör Model yazılımı genellikle HCCI (Homojen Dolgu Sıkıştırma Ateşlemeli) motorların modellenmesi, simülasyonu ve kurulan modellerin doğruluğunun gösterim işlemlerinde kullanılmaktadır. Bunun yanında, buji ateşlemeli (SI) [42, 43] ve sıkıştırma ateşlemeli (CI) [44] motorlarda kurulan modellerin doğruluğunu gösteren araştırmalar mevcuttur. Olasılık yoğunluk fonksiyonuna dayalı 0-Boyutlu Stokastik Reaktör Model yazılımıyla, 1-Boyutlu CFD [45] ve 3-Boyutlu CFD yazılımları [44] birleştirilerek egzoz emisyonu ve yanma karakteristikleri tahmin edilmiştir. Bu çalışmalarda, detaylı ve indirgenmiş mekanizmalar kullanılarak bu mekanizmaların yanma ve egzoz emisyonlarına etkileri incelenmiştir.

1.2. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı

Literatür incelemesinden gaz yakıtlar (özellikle doğalgaz) ve biyodizel pilot yakıtı

kullanılan çift yakıtlı motorlar konusunda kapsamlı stokastik reaktör modeline dayalı teorik bir çalışmanın bulunmadığı belirlenmiştir. Bu çalışmada, stokastik reaktör model yaklaşımı ile biyodizel pilot yakıtlı doğal gaz motorunda silindir basıncı için teorik bir modelin kurulması amaçlanmıştır. Çalışma kapsamında, "Kinetics & SRM Engine Suite" motor simülasyonu yazılımı kullanılmıştır [19]. Modelin sonuçları deneysel [13] veriler ile doğrulanmıştır. Deneysel verilerin elde edilmesinde kullanılan deney motorunun teknik özellikleri Tablo 2'de gösterilmiştir.

Tablo 2. Deney Motorunun Teknik Özellikleri

Tanımlamalar	Teknik Özellik
Motor modeli	ND 130DI
Motor tipi	Tek silindirli direkt püskürtmeli (DI) motor
Çap × Strok (mm)	95 × 95
Strok hacmi (cm ³)	673
Sıkıştırma oranı	18
Emme supabının açılması	340° ÜÖNÖ (Üst Ölü Noktadan Önce)
Emme supabının kapanması	224° ÜÖNÖ (Üst Ölü Noktadan Önce)
Egzoz supabının açılması	224° ÜÖNS (Üst Ölü Noktadan Sonra)
Egzoz supabının kapanması	340° ÜÖNS (Üst Ölü Noktadan Sonra)
Yanma odası tipi	Açık yanma odalı
Maksimum güç değeri (Alman beygir gücü - dev/dak)	13 - 2400

/..

Tablo 2. Deneden Motorunun Teknik Özellikleri (Cont')

Tanımlamalar	Teknik Özellik
Maksimum döndürme momenti (N.m - dev/dak)	42 - 2000
Soğutma suyu sıcaklığı (°C)	70 ± 2

Kaynak: [13, 14]

2. Yöntem

2.1. Kimyasal Kinetik Model

"Kinetics & SRM Engine Suite" yazılımının çalışması için ilgili yakıtın kimyasal kinetik mekanizmasına ihtiyaç duyulmaktadır. Kimyasal kinetik mekanizmalar ilk olarak detaylı kinetik mekanizmalar olarak geliştirilmiştir. Ancak, detaylı kimyasal kinetik mekanizmaların kullanılması çözüm süresinin artmasına neden olmaktadır. Bu problemi çözmek için yakıtların indirgenmiş kimyasal kinetik mekanizmaları bazı indirgeme yöntemleri kullanılarak elde edilmekte ve indirgenmiş kimyasal kinetik mekanizmalarıyla analiz yapılmaktadır. Bu çalışmada 'metil dekenoat/metil-9-dekenoat/n-heptan' indirgenmiş kimyasal kinetik mekanizması (ERC-MultiChem+Bio)[46] biyodizel ve doğalgaz yakıtlarını temsil etmek için seçilmiştir.

2.2. Stokastik Reaktör Model Yaklaşımı ve Çözüm Yöntemi

Stokastik Reaktör Model (SRM) gerçek akışkan parçacıkları ve silindir içerisindeki homojenlik kavramlarının yerine sanal stokastik parçacıklar ve istatistiksel homojenlik kavramlarının geçmesi düşüncesini temel alan uzaysal olarak sıfır boyutlu bir modeldir [47, 48]. Her bir sanal parçacık kütle, sıcaklık ve kimyasal bileşimi temsil etmektedir. Bunun yanında, bu parçacıklar silindir duvarlarına yakın olan diğer parçacıklarla karışabilme kabiliyetine de sahiptirler. Silindirin içindeki maddeler basınç ve hacim değişikliği, kimyasal reaksiyonlar, ısı transferi, türbülanslı

karışma ve yakıt püskürtme olaylarına bağlıdır. Bu olaylar konumdan bağımsızdır. İlgili bütün parametreler bu işlemlerden elde edilir. Bu parametreler genel ve yerel olarak alt bölümlere ayrılır ve Monte Carlo parçacık yöntemi kullanılarak SRM eşitliklerinin çözümlenmesiyle elde edilir [49]. Genel parametreler; toplam kütle, hacim, ortalama yoğunluk ve basınç değerlerini ifade ederler ve yanma odası içerisinde sabit değer alırlar. Bu parametrelerin yanma odası içerisinde uzaysalolaraksabitkaldığıvarsayılmaktadır. Yanma odası içerisinde değişen yerel parametreler; her bir bileşenin kütle oranlarını ve sıcaklıklarını ifade ederler. Yerel parametreler, silindir içerisindeki gaz karışımının içeriğini belirleyebilen ve yanma odası içerisinde değişebilen rassal değişkenler olarak varsayılmaktadırlar. Bu rassal değişkenler kütle yoğunluk fonksiyonu (MDF) yardımıyla açıklanabilir [19].

SRM olasılık yoğunluk fonksiyonunun (PDF) motor silindiri boyunca aynı olduğunu farzeden istatistiksel homojenliği esas almaktadır. Silindir boyunca silindir içerisindeki yoğunluğun değişmesinden dolayı, olasılık yoğunluk fonksiyonu yerine kütle yoğunluk fonksiyonu yazılımda işletilmektedir. Kütle yoğunluk fonksiyonu olasılık yoğunluk fonksiyonu ile yoğunluğun çarpılmasından elde edilir ve matematiksel ifadesi aşağıdaki gibidir [19]:

$$F(\psi; t) = \rho(\psi) f(\psi; t) \quad (1)$$

Bu eşitlikte ρ yoğunluğu, F kütle yoğunluk fonksiyonunu ve ψ kütle, sıcaklık, basınç gibi özellikleri temsil eden bir parametreyi ifade etmektedir. Kütle yoğunluk fonksiyonunun zamana göre değişimi aşağıdaki PDF eşitliği aracılığıyla tanımlanır [19]:

$$\begin{aligned}
\frac{\partial}{\partial t} F(\psi; t) = & - \underbrace{\sum_{j=1}^{N_s+1} \frac{\partial}{\partial \psi_j} [G_j(\psi) F(\psi; t)]}_{\text{kimyasal reaksiyon}} + \underbrace{\sum_{j=1}^{N_s+1} \frac{\partial}{\partial \psi_j} [A(\psi) F(\psi; t)]}_{\text{türbülanslı karışma}} \\
& - \underbrace{\frac{1}{V} \frac{dV}{dt} F(\psi; t)}_{\text{piston hareketi}} - \underbrace{\frac{\partial}{\partial \psi_{N_s+1}} [U(\psi_{N_s+1}) F(\psi; t)]}_{\text{taşımalla ısı transferi}} + \underbrace{\frac{F_c(\psi; t)}{\tau_{crev}} - \frac{F(\psi; t)}{\tau_{cyl}}}_{\text{üst segman kenarı boşluk hacmi}} + \underbrace{\frac{F_f(\psi; t)}{\tau_f}}_{\text{yakıt enjeksiyonu}}
\end{aligned} \quad (2)$$

Bu eşitlikte N_s+1 rastsal skaler değişken sayısını, G_j kimyasal kinetik mekanizmaları tanımlayan çözüm fonksiyonu, $A(\psi)$ silindir içerisinde meydana gelen türbülans ile karışma işleminin belirten fonksiyonu, V strok hacmini, $U(\psi_{N_s+1})$ silindir dolgusuyla duvarlar arasındaki taşımalla ısı transfer fonksiyonu, F_c ve F_f yakıt ve piston üstü ile silindir gömleği arasındaki dar boşluk içerisindeki gazın kütle yoğunluk fonksiyonu ve τ_{crev} , τ_{cyl} ve τ_f sırasıyla piston üstü ile silindir gömleği arasındaki dar boşluk içerisindeki gazın, silindir içerisindeki gazın ve yakıtın karakteristik kalma süreleridir. Kalma süresi, bir özel yapı (reaktör, motor, göl vb.) içerisinde bir akışkan parçacığının harcadığı zamanı veya ortalama zamanı ifade eder. Eşitlik (2)'de başlangıç şartları aşağıdaki gibi ifade edilmektedir [19]:

$$F(\psi; 0) = F_0(\psi) \quad (3)$$

Eşitlik (2)'nin sağ tarafındaki terimler silindir içinde meydana gelen fiziksel süreçleri ifade etmektedir. Bu eşitlik Monte Carlo stokastik parçacık yöntemi aracılığıyla çözümlenir [19, 49]. Grup ortalamalı olasılık yoğunluk fonksiyonu şu şekilde ifade edilir [19]:

$$f(\psi; t) \approx \frac{1}{N_{par}} \sum_{i=1}^{N_{par}} \delta(\psi - \psi^{(i)}(t)) \quad (4)$$

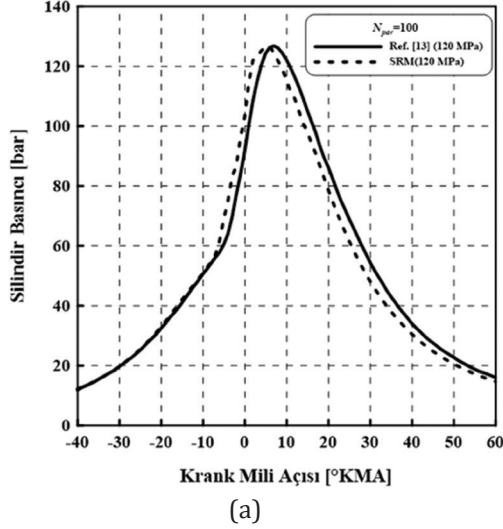
N_{par} stokastik parçacıkların bir grubu olasılık yoğunluk fonksiyonunun istatistiksel gösterimi ve δ (Dirac Delta), sürekli

olmayan dağılım fonksiyonuna (Heaviside fonksiyonu=Birim adım fonksiyonu) karşılık gelen olasılık yoğunluk fonksiyonudur. δ fonksiyonu birim adım fonksiyonunun türevidir [49]. Eşitlik (2)'yi çözmek için, her bir terimi ayrı olarak işleyen işlemci ayırma tekniği [47, 49, 50] uygulanır.

3. Bulgular ve Tartışma

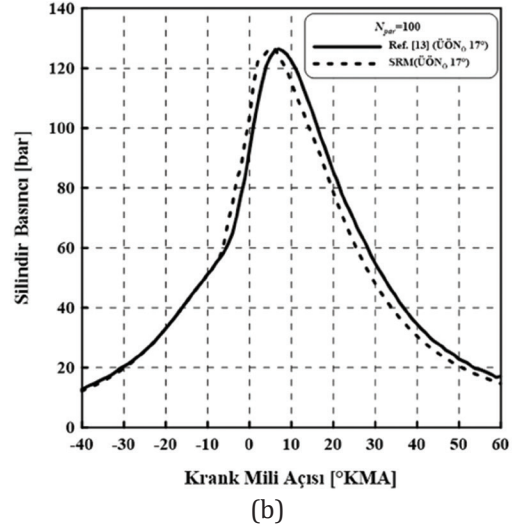
Bu çalışmada; silindir basınç değişimi, biyodizel pilot yakıtının en uygun püskürtme zamanlaması ve en uygun püskürtme basıncı için 'Kinetics & SRM Engine Suite' yazılımında en uygun stokastik parçacık sayısında ve farklı stokastik parçacık sayılarında modelleme ve simülasyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmada sabit motor devir sayısında (1800 dev/dak) ve %75 yük değerinde basınç ve ısı salımı oranı değerlerinin krank açısına göre değişimi incelendiğinden dolayı [13] simülasyonlar da belirtilen bu koşullarda gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar 1800 dev/dak devir sayısında ve %75 yük değeri için Şekil 2-4'de sunulmuştur. En uygun biyodizel pilot yakıt püskürtme zamanlaması üst ölü noktadan önce ($\ddot{U}ÖN_0$) 17° KMA ve en uygun biyodizel pilot yakıt püskürtme basıncı (120 MPa) değerleri ortalama indike basınç (IMEP) yardımıyla belirlenmiştir. Modelin geçerliliğini göstermek için, en uygun iki durumun (120 MPa ve $\ddot{U}ÖN_0$ 17° KMA) silindir basıncının krank açısına göre değişim diyagramları Şekil 2'de gösterilmiştir. Şekil 2 (a)'da görüldüğü gibi, simülasyon basınç değerleri deneysel basınç değerlerine göre 120 MPa biyodizel pilot yakıt püskürtme

basıncı için yaklaşık %6.6 hata oranıyla doğrulanmıştır. Şekil 2 (b)'de görüldüğü gibi, $\dot{U}ÖN_0$ 17° KMA biyodizel pilot yakıt püskürtme zamanlaması için yaklaşık %7.3 hata oranıyla doğrulanmıştır [51].



faidalanılarak hesaplanmaktadır.

En uygun pilot yakıt püskürtme basıncı için elde edilen MAPE değerleri; 50 stokastik parçacık sayısında %6.96, 100 stokastik parçacık sayısında %6.65,

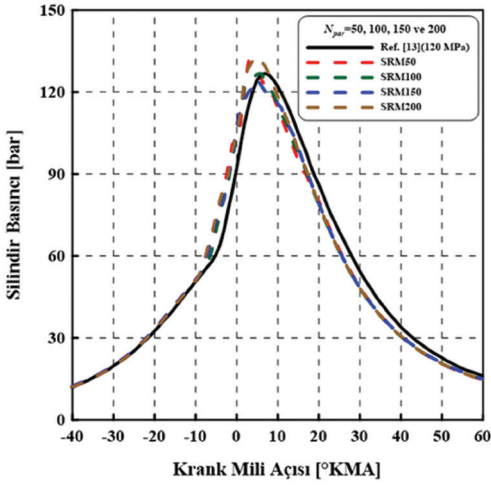


Şekil 2. (a) 120 MPa Pilot Yakıt Püskürtme Basıncı ve (b) 17° KMA Püskürtme Avansında Yapılan Pilot Yakıt Püskürtme için Silindir Basıncı Verileri ile Teorik Modelin Doğrulanması

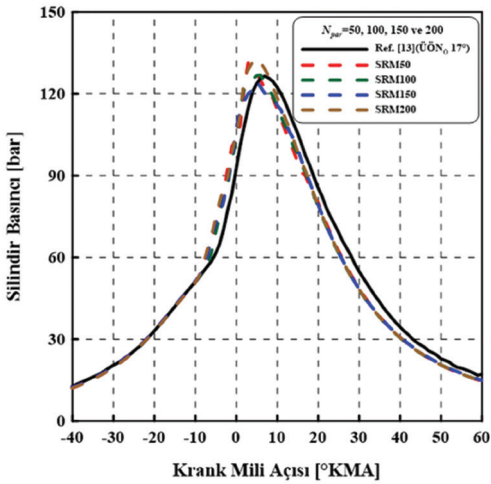
Şekil 3'te en uygun biyodizel pilot yakıt püskürtme basıncı (120 MPa) için farklı stokastik parçacık sayılarındaki silindir basıncının krank açısına göre değişimi gösterilmiştir. Şekil 3'te tüm parçacık sayılarında yaklaşık -10°KMA'dan 2°KMA'na kadar deneysel basınç verisinin üstünde değerler aldığı gözlemlenmiştir. Şekil 4'te en uygun biyodizel pilot yakıt püskürtme zamanlaması ($\dot{U}ÖN_0$ 17° KMA) için farklı stokastik parçacık sayılarındaki silindir basıncının krank açısına göre değişimi gösterilmiştir. Şekil 4'te bütün parçacık sayılarında yaklaşık -10°KMA'dan 6°KMA'na kadar deneysel basınç verisinin üstünde değerler aldığı gözlemlenmiştir. Her iki durum için deneysel ve simülasyon basınç eğrileri arasındaki yakınlık ilişkisi ortalama mutlak yüzde hata (MAPE) ile ifade edilmiştir. MAPE değerlerini hesaplarken her bir krank açısındaki deneysel ve simülasyon basınç değerlerinden

150 stokastik parçacık sayısında %6.58 ve 200 stokastik parçacık sayısında %6.99 olarak elde edilmiştir. En uygun pilot yakıt püskürtme zamanlaması için elde edilen MAPE değerleri ise; 50 stokastik parçacık sayısında %7.64, 100 stokastik parçacık sayısında %7.31, 150 stokastik parçacık sayısında %7.29 ve 200 stokastik parçacık sayısında %7.74 olarak elde edilmiştir.

Bu iki en uygun durumda, MAPE değerlerine göre kıyaslama yapıldığında deneysel basınç verisine en yakın elde edilen stokastik parçacık 150 iken en uzak stokastik parçacık 200 olduğu görülmektedir. Ancak, bu yazılımda 100 stokastik parçacık sayısı varsayılan değer olarak belirlenmiştir. Bu parçacık sayısında simülasyon işlemi gerçekleştirilmiş sonraki adımlarda simülasyon girdi değerleri değiştirilmeksizin sadece stokastik parçacık sayıları değiştirilerek simülasyonlar yapılmıştır.



Şekil 3. En Uygun Pilot Yakıt Püskürtme Basıncı için Farklı Stokastik Parçacık Sayılarında Silindir Basıncının Krank Açısına Göre Değişimi



Şekil 4. En Uygun Pilot Yakıt Püskürtme Zamanlaması için Farklı Stokastik Parçacık Sayılarında Silindir Basıncının Krank Açısına Göre Değişimi

Simülasyon basınç değerlerinin sıkıştırma ve yanmanın başlangıç bölgelerinde deneysel basınç değerlerinden büyük olması ve genişleme bölgesinde deneysel basınç değerlerinden küçük olmasının nedenlerinden ilki dar boşluk akışını sağlayan hacmin (% cinsinden) yaklaşık olarak hesaplanması ve hesaplanan değerlerin simülasyonda

girdi değeri olarak girilmesidir. İkinci neden, sayısal çözümleme için gerekli olan başlangıç sınır şartı değerlerinin (başlangıç basıncı ve sıcaklığı) tam olarak bilinmemesi ve deneme yanılma yöntemiyle belirlenmesidir. Üçüncü neden, türbülans karışmayı modelleyebilmek için uygun karışma modelinin seçimi ve seçilen modele göre ilgili parametrelerin (girdap oranı, dönme oranı, vb.) varsayılan değer olarak kabul edilmesidir. Dördüncü neden, ısı transferinin modellenmesinde piston üstü-silindir kafası-silindir gömleği sıcaklık değerlerinin deneme yanılma yöntemi aracılığıyla yaklaşık olarak belirlenmesidir. Sonucu ve en önemli neden ise, alternatif yakıtlardan biri olan biyodizel için kimyasal kinetik mekanizmaların yeni geliştirilmeye başlanmış olması ve hesaplama süresini kısaltması açısından biyodizel için geliştirilmiş olan detaylı kimyasal kinetik mekanizmasının indirgenmiş sürümünün kullanılmış olmasıdır.

4. Sonuçlar ve Öneriler

Bu çalışmada, simülasyon işlemi sonucunda en uygun biyodizel pilot yakıt püskürtme basıncı (120 MPa) ve en uygun biyodizel pilot püskürtme zamanlaması (ÜÖN₀ 17° KMA) durumlarında farklı stokastik parçacıklar için simülasyon ve deneysel silindir basınç değerlerinin belirli hata oranlarında birbirleriyle uyumlu olduğu gözlemlenmiştir. Her iki durumda modelin geçerliliğini göstermek için, 100 stokastik parçacık sayısında gerçekleştirilen simülasyon işlemi sonucunda silindir basınç değerleriyle deneysel silindir basınç değerlerinin belirli hata oranlarında birbirleriyle uyumlu olduğu gözlemlenmiştir.

Bu çalışma ile biyodizel pilot yakıtlı doğalgaz motoru stokastik reaktör model yaklaşımıyla ilk kez incelenmiş ve bu yaklaşımın çift yakıtlı motorlarda uygulanabilirliği gösterilmiştir. Mevcut olan her bir biyodizelin kendisine özgü kimyasal

kinetik mekanizması geliştirilebilir ve bu kimyasal kinetik mekanizmalar ile simülasyonlar gerçekleştirilebilirse deneysel ve simülasyon yanma, motor performansı ve egzoz emisyon karakteristikleri incelenebilir. Bu yöntemin deneysel verileri belirli hata oranıyla doğrulama işleminin sonrasında; farklı motor parametrelerinin (motor devir sayısı, gaz ve sıvı yakıtın kimyasal bileşenleri, pilot yakıt püskürtme miktarları gibi...) ve Homojen Dolgulu Sıkıştırma Ateşlemeli (HCCI), buji ateşlemeli (SI), direkt benzin püskürtmeli (GDI) motorlar gibi farklı motor çalışma yöntemlerinin yanma, motor performansı ve egzoz emisyon karakteristikleri incelenebilir. Yazılımda tanımlanan kullanıcıya kapalı parametreler (dar boşluk akışını sağlayan hacim oranı, kütle ve zaman faktörleri) iyileştirilebilirse özellikle sıkıştırma sonu ve yanmanın başladığı bölgede simülasyon sonuçları deneysel sonuçlara yaklaşabilir. Son olarak, pilot yakıtı değiştirmeksizin ana yakıtlar biyogaz, hava gazı ve LPG olan çift yakıtlı gemi makinelerinin tasarlanması için bu yakıtları içeren kimyasal kinetik mekanizmalar geliştirilebilirse modelleme ve simülasyon işlemleri yapılarak deneysel ve simülasyon yanma karakteristikleri belirlenebilir ve çevre dostu gemi makineleri üretilebilir.

Kaynakça

- [1] Doğan, H. E., Arslan, H. and Mehdiyev, R. (2013). Theoretical and Experimental Analysis of Nitrogen Oxide Formation in A Diesel Engine Converted to LPG. *Journal of ETA Maritime Science*, 1(2):27-38.
- [2] Smart, I. (1991). Natural Gas as a Dual Fuel in Marine Engines – An Operational Study. SAE Technical Paper, Paper No. 911662.
- [3] Aabo, K. and Laursen, R. S. (2009). New Optimization of ME-GI Dual Fuel Engines for LNG Carriers and Marine Vessels in General. *Journal of the JIME*, 44(6):25-36.
- [4] Hodgins, K., Hill, P., Ouellette, P. and Hung, P. (1996). Directly Injected Natural Gas Fueling of Diesel Engines. SAE Technical Paper, Paper No. 961671.
- [5] Karim, G. A. (1980). A review of combustion processes in the dual fuel engine – the gas diesel engine. *Progress in Energy and Combustion Science*, 6(3):277-285.
- [6] Abd Alla, G. H., Soliman, H. A., Badr, O. A. and Abd Rabbo, M. F. (2002). Effect of injection timing on the performance of a dual fuel engine. *Energy Conversion and Management*, 43(2):269-277.
- [7] Papagiannakis, R. G. and Hountalas, D. T. (2004). Combustion and exhaust emission characteristics of a dual fuel compression ignition engine operated with pilot diesel fuel and natural gas. *Energy Conversion and Management*, 45(18): 2971-2987.
- [8] Paul, A., Bose, P. K., Panua, R. S. and Banerjee, R. (2013). An experimental investigation of performance-emission trade off of a CI engine fueled by diesel-compressed natural gas (CNG) combination and diesel-ethanol blends with CNG enrichment. *Energy*, 55:787-802.
- [9] Britto Jr., R. F. and Martins, C. A. (2014). Experimental analysis of a diesel engine operating in Diesel-Ethanol Dual Fuel mode. *Fuel*, 134:140-150.
- [10] Karim, G. A. (1968). The ignition of a premixed fuel and air charge by pilot fuel spray injection with reference to dual-fuel combustion, SAE Technical Paper, Paper No. 680768.
- [11] Namasivayam, A. M., Crookes, R. J., Korakianitis, T. and Olsen, J. (2009). Assessment of combustion in natural gas dual-fuelled compression ignition engines with dimethyl ether and rapeseed methyl ester pilot ignition.

- International Journal of Engine Research, 10(3):165-174.
- [12] Hoekman, S. K., Broch, A., Robbins, C., Cenicerros, E. and Natarajan, M. (2012). Review of biodiesel composition, properties and specifications. Review of biodiesel composition, properties, and specifications, 16(1):143-169.
- [13] Ryu, K. (2013a). Effects of pilot injection timing on the combustion and emissions characteristics in a diesel engine using biodiesel-CNG dual fuel. Applied Energy, 111:721-730.
- [14] Ryu, K. (2013b). Effects of pilot injection pressure on the combustion and emissions characteristics in a diesel engine using biodiesel-CNG dual fuel. Energy Conversion and Management, 76:506-516.
- [15] Korakianitis, T., Namasivayam, A. M. and Crookes, R. J. (2011). Diesel and rapeseed methyl ester (RME) pilot fuels for hydrogen and natural gas dual-fuel combustion in compression-ignition engines. Fuel, 90(7):2384-2395.
- [16] Paul, A., Panua, R. S., Debroy, D. and Bose, P. K. (2014). Effect of compressed natural gas dual fuel operation with diesel and Pongamia pinnata methyl ester (PPME) as pilot fuels on performance and emission characteristics of a CI (compression ignition) engine. Energy, 68:495-509.
- [17] Tarabet, L., Loubar, K., Lounici, M. S., Khiari, K., Belmrabet, T. and Tazerout, M. (2014). Experimental investigation of DI diesel engine operating with eucalyptus biodiesel/natural gas under dual fuel mode. Fuel, 133:129-138.
- [18] Bora, B. J. and Saha, U. K. (2016). Experimental evaluation of a rice bran biodiesel – biogas run dual fuel diesel engine at varying compression ratios. Renewable Energy, 87:782-790.
- [19] CMCL User Manual (2014). kinetics & srm engine suite, cmcl innovations. Cambridge, United Kingdoms.
- [20] Boretti, A. (2012). Stochastic reactor modelling of multi modes combustion with diesel direct injection or hydrogen jet ignition start of combustion. International Journal of Hydrogen Energy, 37(18):13555-13563.
- [21] Tunér, M. (2008). Stochastic Reactor Models for Engine simulations, Doctoral Thesis (Ph.D), Lund University, Faculty of Engineering, Lund.
- [22] Altair Hyperworks. (2016). Stokastik Parçacıklar. Erişim Tarihi: 7 Nisan 2016, <http://www.altairhyperworks.com/ResourceLibrary.aspx?title=Gasoline+engine+development+using++LOGEngine>
- [23] Fisher, E. M., Pitz, W. J., Curran, H. J. and Westbrook, C. K. (2000). Detailed chemical kinetic mechanisms for combustion of oxygenated fuels. Proceedings of the Combustion Institute, 28(2):1579-1586.
- [24] Gail, S., Thomson, M. J., Sarathy, S. M., Syed, S. A., Dagaut, P., Diévar, P., Marchese, A. J. and Dryer, F. L. (2007). A wide-ranging kinetic modeling study of methyl butanoate combustion. Proceedings of the Combustion Institute, 31(1):305-311.
- [25] Hakka, M. H., Glaude, P. A., Herbinet, O. and Battin-Leclerc, F. (2009). Experimental study of the oxidation of large surrogates for diesel and biodiesel fuels. Combustion and Flame, 156(11):2129-2144.
- [26] Herbinet, O., Pitz, W. J. and Westbrook, C. K. (2010). Detailed chemical kinetic mechanism for the oxidation of biodiesel fuels blend surrogate. Combustion and Flame, 157(5):893-908.
- [27] Sarathy, S. M., Gail, S., Syed, S. A.,

- Thomson, M. J. and Dagaut, P. (2007). A comparison of saturated and unsaturated C4 fatty acid methyl esters in an opposed flow diffusion flame and a jet stirred reactor. *Proceedings of the Combustion Institute*, 31(1):1015-1022.
- [28] Brakora, J. L., Ra, Y. and Reitz, R. D. (2011). Combustion Model for Biodiesel-Fueled Engine Simulations using Realistic Chemistry and Physical Properties. *SAE International Journal of Engines*, 4(1):931-947.
- [29] Luo, Z., Lu, T., Maciaszek, M. J., Som, S. and Longman, D. E. (2010). A reduced mechanism for high-temperature oxidation of biodiesel surrogates. *Energy & Fuels*, 24(12):6283-6293.
- [30] Luo, Z., Plomer, M., Lu, T., Som, S., Longman, D. E., Sarathy, S. M. and Pitz, W. J. (2012). A reduced mechanism for biodiesel surrogates for compression ignition engine applications. *Fuel*, 99:143-153.
- [31] Wang, W., Gowdagiri, S. and Oehlschlaeger, M. A. (2013). Comparative study of the autoignition of methyl decanoates, unsaturated biodiesel fuel surrogates. *Energy & Fuels*, 27(9):5527-5532.
- [32] Banapurmath, N. R., Tewari, P. G. and Hosmath, R. S. (2008). Experimental investigations of a four-stroke single cylinder direct injection diesel engine operated on dual fuel mode with producer gas as inducted fuel and Honge oil and its methyl ester (HOME) as injected fuels. *Renewable Energy*, 33(9):2007-2018.
- [33] Carlucci, A. P., Ficarella, A. and Laforgia, D. (2014). Potentialities of a Common Rail Injection System for the Control of Dual Fuel Biodiesel-Producer Gas Combustion and Emissions. *Journal of Energy Engineering*, 1-8.
- [34] Yoon, S. H. and Lee, C. S. (2011). Experimental investigation on the combustion and exhaust emission characteristics of biogas – biodiesel dual-fuel combustion in a CI engine. *Fuel Processing Technology*, 92(5):992-1000.
- [35] Pattanaik, B. P., Nayak, C. and Nanda, B. K. (2013). Investigation on utilization of biogas & Karanja oil biodiesel in dual fuel mode in a single cylinder DI diesel engine. *International Journal of Energy and Environment*, 4(2):279-290.
- [36] Barik, D. and Murugan, S. (2014). Simultaneous reduction of NOX and smoke in a dual fuel DI diesel engine. *Energy Conversion and Management*, 84:217-226.
- [37] Geo, V. E., Nagarajan, G. and Nagalingam, B. (2008). Studies on dual fuel operation of rubber seed oil and its bio-diesel with hydrogen as the inducted fuel. *International Journal of Hydrogen Energy*, 33(21):6357-6367.
- [38] Korakianitis, T., Namasivayam, A. M. and Crookes, R. J. (2010). Hydrogen dual-fuelling of compression ignition engines with emulsified biodiesel as pilot fuel. *International Journal of Hydrogen Energy*, 35(24):13329-13344.
- [39] Sigar, C. P., Soni, S. L., Sharma, D. and Mathur, J. (2008). Effect of LPG induction on performance and emission characteristics of biodiesel in a CI engine. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects*, 30(16):1451-1459.
- [40] Doijode, E. D., Tewari, P., Basavarajappa, Y. H., Banapurmath, N. R. and Yaliwal, W. S. (2013). Experimental studies on manifold injected CNG – biodiesel dual fuel engine. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, 3(3):77-83.
- [41] Ghareghani, A., Hosseini, R., Mirsalim, M., Jazayeri, S. A. and Yusaf, T. (2015).

- An experimental study on reactivity controlled compression ignition engine fueled with biodiesel/natural gas. *Energy*, 89:558-567.
- [42] Lauer, T., Heiss, M., Bobicic, N., Holly, W. and Pritze, S. (2014). A comprehensive simulation approach to irregular combustion. SAE Technical Paper, Paper No. 2014-01-1214.
- [43] Pasternak, M., Mauss, F., Sens, M., Riess, M., Benz, A. and Stapf, K. G. (2016). Gasoline engine simulations using zero-dimensional spark ignition stochastic reactor model and three-dimensional computational fluid dynamics engine model. *International Journal of Engine Research*, 17(1):76-85.
- [44] Pasternak, M., Mauss, F., Perlman, C. and Lehtiniemi, H. (2014). Aspects of 0D and 3D modeling of soot formation for diesel engines. *Combustion Science and Technology*, 186(10-11):1517-1535.
- [45] Bhawe, A., Kraft, M., Montorsi, L. and Mauss, F. (2004). Modelling a dual-fuelled multi-cylinder HCCI engine using a PDF based engine cycle simulator. SAE Technical Paper, Paper No. 2004-01-0561.
- [46] Brakora, J. L. (2012). A comprehensive combustion model for biodiesel-fueled engine simulations, Doctoral Thesis (Ph. D), University of Wisconsin, Mechanical Engineering, Madison, WI.
- [47] Ahmedi, A., Ahmed, S. S. and Kalghatgi, G. T. (2015). Simulating combustion in a PCI (premixed compression ignition) engine using DI-SRM and 3 components surrogate model. *Combustion and Flame*, 162(10):3728-3739.
- [48] Maurya, R. K. and Akhil, N. (2016). Numerical investigation of ethanol fueled HCCI engine using stochastic reactor model. Part 2: Parametric Study of Performance and emissions characteristics using new reduced ethanol oxidation mechanism. *Energy Conversion and Management*, 121:55-70.
- [49] Pope, S. B. (1985). PDF Methods for Turbulent Reactive Flows. *Progress in Energy and Combustion Science*, 11:119-192.
- [50] Strang, G. (1968). On the construction and comparison of difference schemes. *SIAM Journal on Numerical Analysis*, 5(3):506-517.
- [51] Pehlivan, E. F. (2016). Stokastik Reaktör Model yaklaşımı ile biyodizel pilot yakıtlı doğalgaz motoru simülasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.