

Sıkıştırma oranının dizel motorun emisyon ve performans karakteristiklerine etkisinin Diesel RK yazılımı kullanılarak incelenmesi

Investigation of the effect of compression ratio on the emission and performance characteristics of diesel engines with using Diesel RK software

Fikret POLAT^{*1,a}

¹ Düzce Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 81620, Düzce

• Geliş tarihi / Received: 11.10.2021

• Düzeltilek geliş tarihi / Received in revised form: 13.05.2022

• Kabul tarihi / Accepted: 23.05.2022

Öz

Bu çalışmanın temel amacı, dizel yakıtta metanol ve Al₂O₃ nanopartikül ilavesiyle elde edilen yakıtlarla çalışan tek silindirli bir dizel motorun performans ve emisyon özellikleri üzerinde sıkıştırma oranının (SO) etkilerini gözlemlemektir. Bu amaçla Diesel RK yazılımı kullanılmış ve simülasyon modeli oluşturulmuştur. Oluşturulan simülasyon modeli daha önce yapılan deneysel çalışma ile doğrulanmış ve maksimum %6.5'lik hata elde edilmiştir. Model doğrulandıktan sonra 16.5, 17.5 ve 18.5 olmak üzere farklı sıkıştırma oranlarında analizler yapılmıştır. Analizler 1500 rpm sabit motor devrinde ve tam yükte gerçekleştirilmiştir. Sonuçlarda, tüm test yakıtları için sıkıştırma oranı arttıkça özgül yakıt tüketimi (ÖYT) ve NOx değerinin de arttığı gözlemlenmiştir. Minimum ÖYT değeri 16.5 sıkıştırma oranında 219 g/kWh olarak dizel yakıtta elde edilmiştir. Minimum NOx değeri 16.5 sıkıştırma oranında 651 ppm olarak M15A100 (hacimce %15 metanol, %85 dizel yakıttan oluşan ve M15 olarak adlandırılan test yakıtına 100 ppm Alüminyum oksit nanoparçacık katılarak elde edilen test yakıtı) yakıtında elde edilmiştir.

Anahtar kelimeler: Diesel RK, Emisyon, Performans, Sıkıştırma oranı

Abstract

The main purpose of this study is to observe the effects of compression ratio (CR) on the performance and emission characteristics of a single-cylinder diesel engine operating with fuels obtained by adding methanol and Al₂O₃ nanoparticles to diesel fuel. For this purpose, Diesel RK software was used and a simulation model was created. The simulation model created was verified with the previous experimental study and a maximum error of 6.5% was obtained. After the model was validated, analyses were performed at different compression ratios as 16.5, 17.5 and 18.5. Analyses were carried out at 1500 rpm constant engine speed and full load. In the results, it was observed that the brake specific fuel consumption (BSFC) and NOx values increased as the compression ratio increased for all test fuels. The minimum BSFC value was obtained in diesel fuel as 219 g/kWh at a compression ratio of 16.5. The minimum NOx value was obtained in M15A100 (test fuel obtained by adding 100 ppm Aluminium oxide nanoparticles to the test fuel called M15, which consists of 15% methanol, 85% diesel fuel by volume) fuel as 651 ppm at a compression ratio of 16.5.

Keywords: Diesel RK, Emission, Performance, Compression ratio

*a Fikret POLAT; fikretpolat@duzce.edu.tr, Tel: (0541) 205 50 24, orcid.org/ 0000-0003-3767-3156

1. Giriş

1. Introduction

Dünyanın varoluşundan beri, mevcut olan doğal kaynaklar bilim ve teknoloji alanında çok geniş bir uygulama alanına sahip olmuştur. İster ürün imal etsin isterse de hizmet sağlasın, tüm firmalar doğal kaynakları kullanmış ve günümüzde de kullanmaya devam etmektedirler. Örneğin kömür, ham petrol vb. doğal kaynakların bir kısmı enerji santrallerinde, kazanlarda ve taşımacılık sektöründe kullanılmaktadır. Bunun yanı sıra doğal kaynaklar birincil enerji kaynağıdır ve insanoğlu yaşamının hemen her anında enerjiye ihtiyaç duymaktadır. Dolayısıyla enerjinin güvenliği ve halk için kullanılabilirliği politika yapıcılar için öncelik teşkil etmektedir. Dünya genelinde enerji tüketimi son yıllarda katlanarak artmaya devam etmektedir. 1995 yılında 8.588,9 milyon ton (mt) iken 2015 yılında 13147.3 mt'ye yükselmiştir (Ahmad & Zhang, 2020; Dong vd., 2020). Büyük ölçekte baktığımızda ise ülkelerarası savaşların temel sebepleri arasında enerjiye duyulan bu ihtiyaç yatmakta ve ülkeler enerji ihtiyacı kapsamında dışa bağımlılıklarını azaltma ve enerji kaynaklarını efektif kullanma konusunda çeşitli stratejiler benimsemektedirler (Bahadır vd., 2016). Son yıllarda artan dünya nüfusu, endüstriyelleşme ve teknolojik gelişmelerle birlikte enerjiye duyulan ihtiyaç daha da artmış ve doğal kaynaklar tükenme tehlikesiyle yüzleşmek durumunda kalmıştır (Çeçen vd., 2022; Çilgin, 2021). Özellikle petrol kaynaklı enerji kaynaklarının tükenme tehlikesi yakıt fiyatlarında da dalgalanmalara sebebiyet vermiştir. Bunlara ek olarak taşımacılık sektöründen kaynaklanan hava kirliliği de eklenince petrol kaynaklı tükenbilir enerji kaynaklarına alternatif olarak yeni ve yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelmek mecburi hale gelmiştir. The International Energy Outlook'tan elde edilen verilere göre, 2010'dan 2040'a kadar küresel yakıt tüketiminde sadece ulaşım sektörünün %63'lük önemli bir artış göstereceği öngörülmektedir (Mahmudul vd., 2017; Ağbulut vd., 2021). Ulaşım sektörü ağırlıklı olarak fosil yakıtlara, özellikle de benzinli motorlarla kıyaslandığında yakıt verimliliği ve düşük CO₂ emisyonu gibi avantajlara sahip olan dizel motorlara bağımlıdır. Dizel motorların yüksek oranda tercih edilmesine rağmen çevre kirliliği açısından kullanımını kısıtlayan sahip olduğu bazı dezavantajlar da mevcuttur. Bunlardan en önemlisi dizel motorların yanma süresince yüksek NO_x emisyonlarına neden olmalarıdır (Özener, 2019). Bu sebeple, birçok yakıt araştırmacısı çalışmalarında söz konusu emisyonları azaltmak ve dizel motoru kullanımındaki çevresel kaygıları

bertaraf etmek için geleneksel dizel yakıtı, oksijenli katkı maddeleriyle beraber kullanmayı amaçlamışlardır. Bu amaç kapsamında da biyodizel, biyoalkol (etanol, metanol, pentanol, heksanol, dekanol, bütanol) gibi biyoyakıtların dizel yakıtla karışımlarının motorun yanma, performans ve emsiyon değerlerine etkilerini inceleyen bir dizi çalışma yapmışlardır (Balan vd., 2019; Saridemir vd., 2016; Devaraj vd., 2021; Atmanlı & Yılmaz, 2020; Emiroğlu & Şen, 2018; Joy vd., 2020; Karagöz, 2020; Fidan & Alkan, 2014). Paul ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, dizel-biyodizel yakıt karışımlarının yanma özelliklerinin etanol ilavesiyle önemli ölçüde iyileştirilebileceği gözlemlemiştir (Paul vd., 2017). Bir diğer çalışmada Singh ve arkadaşları bütanol ilavesinin NO_x emisyonunda azalma sağladığını rapor etmişlerdir (Singh vd., 2020). Nguyen ve arkadaşları yaptıkları çalışmada balık yağı biyodizelinin kullanımının motor performansı, yakıt püskürtme ve emisyon özelliklerine etkisini araştırmışlar ve deney çıktısı olarak dizele göre daha düşük emisyon değerleri sağladığından dolayı balık yağı biyodizelin dizel motorda yakıt ikamesi olarak kullanılmasının mümkün olduğunu rapor etmişlerdir (Nguyen vd., 2020).

NO_x emisyonlarını azaltmak için son yıllarda hem teknolojiye hızlı gelişmeler hem de nano boyutlu parçacıkların üretilebilirliğinin mümkün hale gelmesi sayesinde nanoparçacıkların kullanımı yaygınlaşmıştır. Nanopartiküller sahip oldukları geniş yüzey alanının etkisiyle aynı anda daha fazla kimyasalın katalizör ile etkileşime girmesine izin verir. Nanopartiküllerin eklenmesi, yakıtın termal iletkenlik, buharlaşma hızı, setan sayısı, ısıtma değeri ve tutuşma gecikmesi gibi fiziksel ve kimyasal özelliklerini iyileştirir. Geniş yüzey alanı ve yüksek enerji seviyeleri, katalitik performansın artmasına neden olur. Literatür taraması yapıldığında birçok araştırmacının nanopartikül, biyodizel ve karışımlarının dizel motorların performans, emisyon ve yanma özellikleri üzerindeki etkisine odaklandığı görülmüştür (Ağbulut vd., 2021; Venu vd., 2021; Manigandan vd., 2020; Dhalad vd., 2020; Soudagar vd., 2021; Saijith vd., 2010). Sıkıştırma oranı (SO), enjeksiyon zamanlaması (EZ), püskürtme basıncı (PB) vb. gibi motor çalışma parametrelerinin değiştirilmesi konusunda ise çok fazla çalışma yapılmamıştır. Banapurmath ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, enjeksiyon zamanlaması, enjeksiyon basıncı, akış hızları vb. diğer tüm çalışma parametrelerini sabit tutup, sıkıştırma oranını 15'ten 17.5'e değiştirerek sıkıştırma oranının motor performansına olan etkisini

gözlemlemek istemişler ve sıkıştırma oranını artırmanın daha yüksek silindir basıncı ve ısı yayılım oranları ile sonuçlandığını ve bunun da fren termal verimliliğinde iyileşmeler (%1.4) sağladığını bildirmişlerdir. Ayrıca, HC ve CO emisyonları önemli ölçüde azalırken, NOx emisyonlarının bir miktar arttığını çalışma çıktısı olarak sunmuşlardır (Banapurmath vd., 2014). Bir diğer çalışmada ise Jaichandar ve arkadaşları sıkıştırma oranını 17.5'ten 18.5'e artırarak testlerini yapmışlar ve biyodizel yakıtlı motorda sıkıştırma oranının artırılmasıyla termal verimlilik, NOx emisyonu ve ısı yayılım oranının arttığını, buna karşılık özgül yakıt tüketimi, CO ve HC emisyonlarının azaldığını bildirmişlerdir (Jaichandar vd., 2014).

Sıkıştırma oranı gibi motor çalışma parametrelerinin motor performans, yanma ve emisyon özelliklerine etkisi konusunda çok fazla deneysel çalışma yapılmamış olmasının nedenleri araştırıldığında sıkıştırma oranının değiştirilmesinin zorluğunun deneysel çalışmayı zorlaştırdığı gerçeği öne çıkmaktadır. Bununla birlikte deneysel çalışmaların maliyetli, oldukça yorucu ve zaman alıcı süreçler olduğu da açıktır. Günümüzde bilgisayar teknolojisi alanındaki gelişmeler birçok problemin sayısal çözümünü mümkün kılmakta ve bu konuda çeşitli yazılımlar kullanılmaya ve geliştirilmeye devam edilmektedir. Diesel RK yazılımı, bir, iki ve dört zamanlı içten yanmalı motorların çalışma süreçlerini taklit etmek ve optimize etmek için tasarlanmış ve son zamanlarda sıkça kullanılan yazılımlardan biridir. Hesaplama süresinin kısa olması bu programı benzer programlardan daha avantajlı kılmaktadır. Şimşek ve arkadaşları Diesel RK yazılımı ile yaptıkları çalışmada 3 farklı alkol türünü (Butanol, Metanol ve Propanol), dizel yakıt ile %5, %10 ve %15 oranlarında karıştırmış ve tek silindirli direkt enjeksiyonlu dizel motorlarda kullanılmasını modellemişlerdir. Bu yakıtları maksimum yükte tutuşma gecikmesi ve yanma süresi açısından dizel yakıtı ile karşılaştırmışlardır. Aynı motor devrinde modellenen yakıtların tutuşma gecikmelerinde, butanol, propanol ve metanolün dizel yakıtına karışım oranı arttıkça tutuşma gecikmelerinin de arttığını belirtmişlerdir. Ayrıca metanolün tüm oranlarında diğer alkollere göre yanma süresinin arttığını ifade etmişlerdir (Şimşek vd., 2017). Bir diğer çalışmada, dizel ve farklı Soya Metil Ester (SME) karışımları ile çalışan tek silindirli, dört zamanlı, direkt enjeksiyonlu dizel motorun performansı ve

emisyonları Diesel-RK simülasyon yazılımı kullanılarak teorik olarak incelenmiştir. SME'nin tüm karışımlarının, saf dizel yakıtla karşılaştırıldığında %28'den fazla NOx emisyonu elde edildiğini ifade etmişlerdir. Enjeksiyon zamanlamasının geciktirilmesinin NOx emisyonlarındaki artışı büyük ölçüde azaltabileceği gözlemlenmiştir. Test edilen tüm yakıtlar arasında, saf dizel çalışmasına kıyasla emisyonlarda iyi bir azalma ile aynı performans sonuçlarını veren en iyi test yakıtının hacimce %20 SME katılan test yakıtı olduğunu belirtmişlerdir (Al-Dawody & Bhatti 2011). Bir diğer çalışmada Rajak ve arkadaşları, optimum sıkıştırma oranı 17.5 olan test motoru üzerinde tam yük koşullarında deneyler yapmış ve sonuçları sayısal model ile karşılaştırmışlardır. Sayısal sonuçların, deneysel sonuçlara %6 civarında yaklaştığını belirtmişlerdir. Simülasyon, %100 yük durumunda sabit motor devrinde, silindir basıncı, egzoz gazı sıcaklığı, fren ısı verimi, özgül yakıt tüketimi ile karbondioksit, nitrojen oksit, partikül madde emisyonları gibi parametreleri tahmin etmek için yapılmıştır. Sonuçlar, AB100 (yosun biyodizel) kullanımının fren termal verimliliğini %2.73, torku %6.66, egzoz gazı sıcaklığını %1.6, karbondioksiti %6.1, nitrojen oksidi %0.5 ve partikül maddeyi %60 azalttığını ifade etmişlerdir (Rajak vd., 2019).

Bu çalışmada ise farklı sıkıştırma oranlarının dizel motorun performans ve emisyon özelliklerine etkisi, Diesel RK yazılımında hazırlanan ve daha önce yapılmış bir deneysel çalışma (Soni & Gupta, 2017) ile doğruluğu ispatlanan model kullanılarak araştırılmıştır.

2. Materyal ve metot

2. Material and method

2.1. Test yakıtları ve test motoru

2.1. Test fuels and test engine

Bu çalışmada 3 farklı test yakıtı tasarlanmıştır. Bunlar DF olarak adlandırılan saf dizel yakıt, M15 olarak adlandırılan hacimce %15 metanol, %85 dizel yakıttan oluşan yakıt ve M15 yakıtına 100 ppm Alüminyum oksit katılarak elde edilen M15A100 olarak adlandırılan test yakıtlarıdır. Test yakıtlarının bazı temel özellikleri Tablo 1'de verilmiştir. Alınan bu değerler daha önce yapılan deneysel çalışmanın verilerinden elde edilmiş (Wei vd., 2021) ve Diesel RK yazılımına da bu değerler girilerek yakıtlar oluşturulmuştur.

Tablo 1. Test yakıtlarının temel özellikleri
Table 1. Main characteristics of test fuels

Özellik	DF	M15	M15A100
Yoğunluk (kg/m ³ ; 15 °C)	830	824	826
Alt ısı değeri (MJ/kg)	42.80	39.55	39.65
Viskozite (cSt @40 °C)	3.35	2.93	3.14
Setan sayısı	50.5	37.1	37.8

Diesel RK programı vasıtasıyla doğal emişli ve hava soğutmalı tek silindirli Kirloskar TV-1 marka dizel motorunun verileri alınarak düzenek hazırlanmış ve testler yapılmıştır. Ayrıca deneyler boyunca test motorunun orijinal değerleri olan 17.5/1 sıkıştırma oranı ve 220 bar enjeksiyon basıncı sabit tutulmuş ve test motorunda herhangi bir değişiklik yapılmamıştır. Test motorunun ana özellikleri Tablo 2'de gösterilmektedir.

Tablo 2. Test motorunun temel özellikleri
Table 2. Main characteristics of test engine

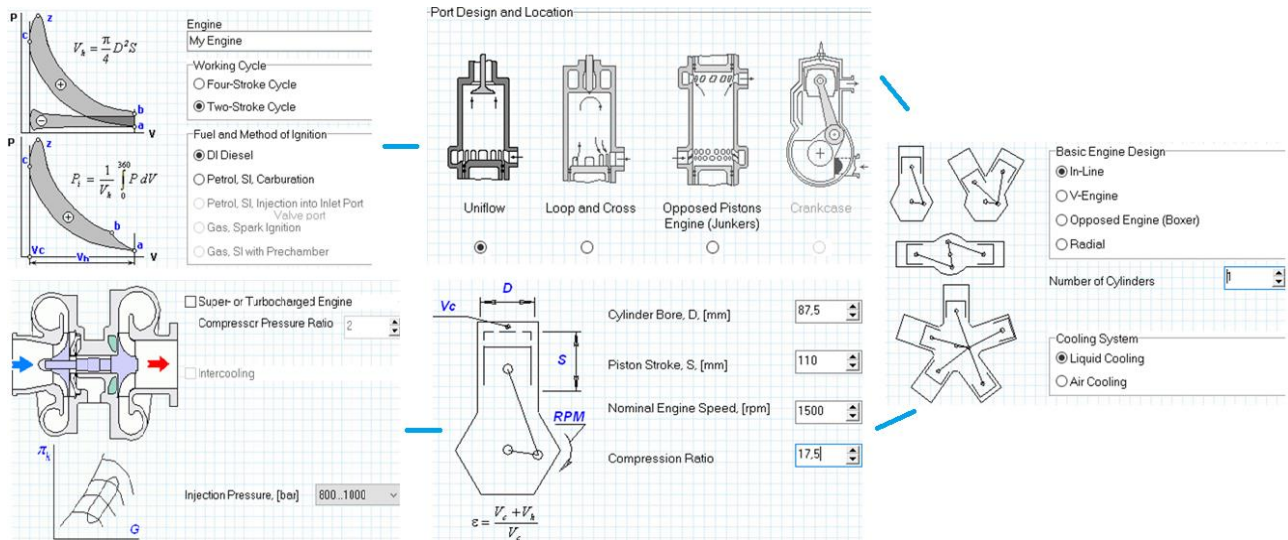
Model	Kirloskar TV-1
Silindir hacmi	661 cc
Sıkıştırma oranı	17.5/1
Çap × strok	87.5 mm × 110 mm
Enjektör açılma basıncı	220 bar
Boyutlar	617 X 504 X 877 mm

2.2. Diesel RK yazılımı

2.2. Diesel RK software

1981-82 yıllarında Bauman Moskova Devlet Teknik Üniversitesi İçten Yanmalı Motorlar (Pistonlu Motorlar) bölümünde geliştirilen

modelleme ve simülasyon yazılımı Diesel RK, esas olarak her türlü güçlendirme ile içten yanmalı motorların çalışma süreçlerini simüle etmek ve optimize etmek için tasarlanmıştır. Bu yazılım sayesinde farklı motor parametreleri (çap, strok, silindir hacmi, sıkıştırma oranı vs.) ve sıvı ya da gaz fark etmeksizin farklı yakıt çeşitleri için içten yanmalı motorların tork eğrilerini, motor performans değerlerini, farklı yüklerde meydana gelecek olası yakıt tüketimi ve emisyon değerlerini hesaplamak mümkündür. Bunu yaparken de diğer hesaplamalı akışkanlar dinamiği programlarına göre analiz süresinin çok daha kısa olması ve bununla beraber yüksek yakınsama değerlerinden dolayı hem akademik çalışmalarda hem de özel sektörde çokça tercih edilmektedir. Simülasyon modeli oluşturulurken önce motorun fabrika verileriyle genel karakteristik ve yapısal özellikleri tanımlanır. Sonrasında testte kullanılacak yakıt veya yakıtların gerekli olan özellikleri (viskozite, ısı değeri, setan sayısı, yoğunluk vs.) girilir ve PM emisyon modeli, NOx emisyon modeli, ısı yayılım modeli, yakıt buharlaşma modeli ve yakıt demeti modeli seçilerek simülasyon modeli oluşturulmuş olur. Şekil 1’de motorun yapısal özelliklerinin girilerek proje oluşturulması için izlenmesi gereken yollar gösterilmektedir.



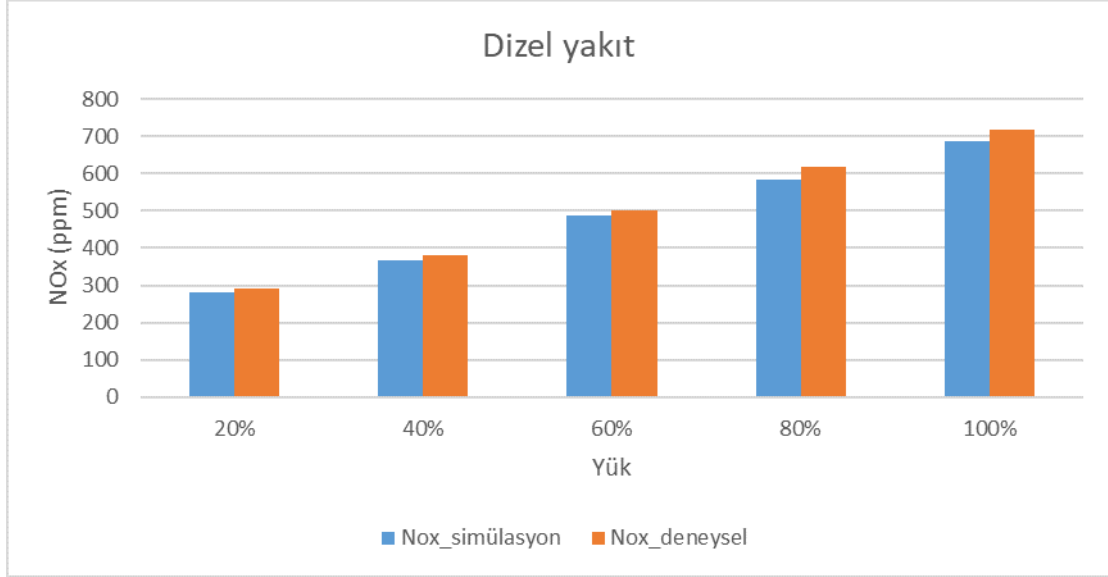
Şekil 1. Dizel RK yazılımı ile proje oluşturma adımları
Figure 1. Project creation steps with Diesel RK software

2.3. Simülasyon modelinin doğruluğunun incelenmesi

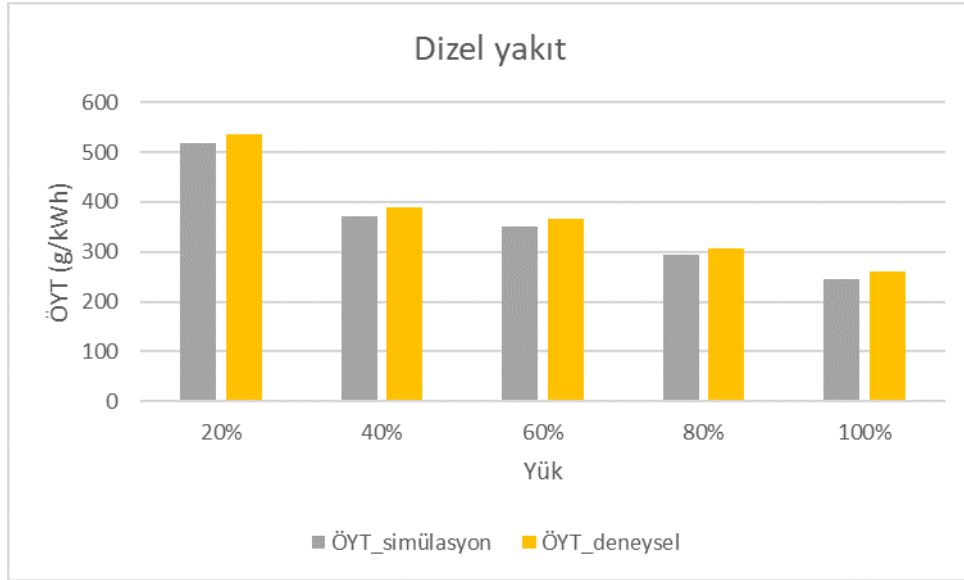
2.3. Examining the accuracy of the simulation model

Bu çalışmada oluşturulan simülasyon modeli önce motorun kendi sıkıştırma oranında oluşturularak

daha önce yapılan deneylerden elde edilen deneysel veriler (Soni & Gupta, 2017), simülasyon verileri ile Şekil 2 ve Şekil 3’te görüldüğü gibi karşılaştırılmış ve elde edilen sonuçların deneysel verilerle örtüştüğü gözlemlenerek modelin doğruluğu ispatlanmıştır.



Şekil 2. Dizel yakıt için yüke göre NOx değerlerinin deney ve simülasyon sonuçlarının karşılaştırılması
Figure 2. Comparison of test and simulation results of NOx values according to load for diesel fuel



Şekil 3. Dizel yakıt için yüke göre ÖYT değerlerinin deney ve simülasyon sonuçlarının karşılaştırılması

Figure 3. Comparison of test and simulation results of BSFC values according to load for diesel fuel

Grafikler incelendiğinde yakınsama olarak maksimum hata ÖYT değeri için %6.5 değeri ile maksimum yükte, NOx değeri içinse %5.5 değeri ile %80 yük değerinde elde edilmiştir. Maksimum %6.5’lik hata kabul edilebilir sınırlar içerisinde

olduğundan hazırlanan simülasyon modelinin analiz için uygunluğu ispat edilmiştir.

3. Bulgular ve tartışma

3. Results and discussion

Bu makale, farklı sıkıştırma oranlarının yakıtların performans ve emisyon özellikleri üzerindeki etkisini araştırmayı amaçlamaktadır. Bu sebeple 17.5 sıkıştırma oranında simülasyon ve deneysel verilerin doğrulanmasından sonra, farklı sıkıştırma oranlarının (16.5, 17.5 ve 18.5) etkisini gözlemlemek için analizler yapılmıştır. Bu çalışma sonucunda tam yükte farklı sıkıştırma oranlarında test yakıtları ile ilgili aşağıdaki performans ve emisyon özellikleri elde edilmiştir.

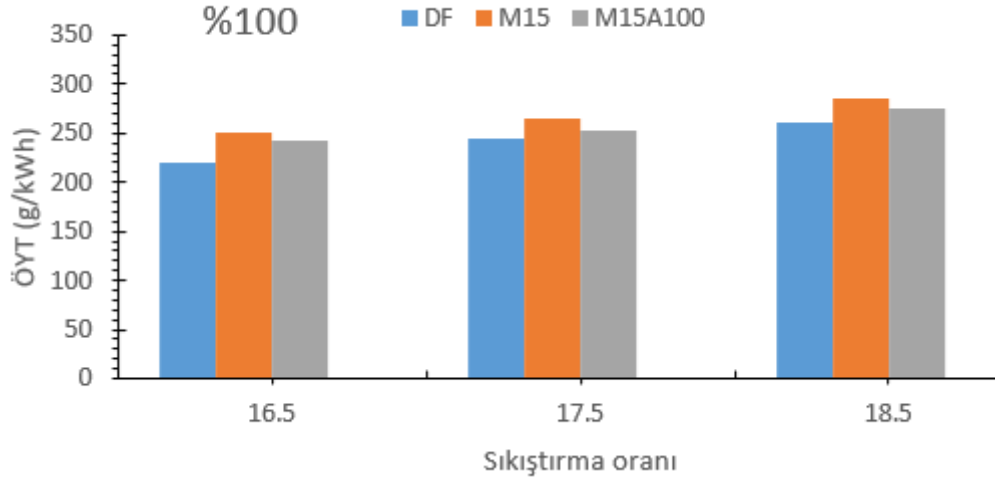
3.1. Özgül yakıt tüketimi

3.1. Brake specific fuel consumption

Özgül yakıt tüketimi (ÖYT), içten yanmalı bir motorun tükettiği yakıtı karşılık olarak krank milinde üretilen gücün verimliliğini ifade eden bir gösterge değeridir. Başka bir deyişle aynı motor yüküne ulaşmak için ne kadar yakıt tüketilmesi gerektiğini ifade eden ve bu sayede farklı test yakıtlarının karşılaştırılmasını sağlayan önemli bir performans göstergesidir. Aynı yüke düşük ÖYT değeri ile ulaşılmak istendiği için ÖYT değeri düşük olan yakıtın performans açısından daha verimli olduğu söylenebilir. Bu çalışmada test

yakıtları arasında DF en yüksek enerji içeriğine sahip olduğundan, Şekil 4'te de görüldüğü gibi diğer test yakıtlarına göre daha az yakıt tüketimi ile aynı yük değeri elde edilmektedir.

Sıkıştırma oranının artması sebebiyle, sıkıştırma ve yanma sonu basınç ve sıcaklık değerleri artış göstermekte ve bu durum da ortalama efektif basıncı artırmaktadır. Aynı şekilde sıkıştırma oranının vuruntuya neden olmayacak kadar yükseltilmesiyle birlikte çıkış gücünde artış ve özgül yakıt tüketiminde iyileşme beklenmektedir (Rajak vd., 2019; Datta & Mandal, 2016; Hariram & Shangar, 2015). Burada dikkate alınması gereken nokta optimum sıkıştırma oranı ibaresidir. Optimum sıkıştırma oranından yüksek sıkıştırma oranlarında vuruntudan dolayı oluşan sürtünmeyi yenmek için ekstra güç harcanmaktadır ve bu durum da performansta düşmeye neden olmaktadır. Literatürde vuruntunun motor performansına etkisini dikkate alan teorik çalışmalar bu durumu doğrulamaktadır (Wang vd., 2002; Bhattacharyya, 2000; Chen vd., 2020). Bu çalışmada da sıkıştırma oranının artmasıyla tüm yakıtlarda yakıt tüketiminin de arttığı Şekil 4'te görülmektedir. Buna sebep olarak da yukarıda ifade edilen durum gösterilebilir.



Şekil 4. Tam yükte farklı sıkıştırma oranlarında test yakıtları için ÖYT değerleri
Figure 4. BSFC values for test fuels at different compression ratios under full load

Ayrıca Şekil 4 incelendiğinde, metanol ilavesinin özgül yakıt tüketiminde artışa neden olduğu görülmektedir. Bunun altında yatan sebep olarak metanol ilaveli test yakıtının alt ısıl değerinin dizel yakıtı göre daha düşük olması gösterilebilir. Yakıtın daha düşük alt ısıl değere sahip olması demek karışımın daha az enerji açığa çıkarıyor olması demektir. Açığa çıkan bu daha az enerji, yakıtı tamamen yakmak için yeterli gelmemekte ve

daha düşük güç üretilmesine sebep olmaktadır. Bu nedenle, motordan aynı miktarda güç çıkışını korumak için yanma odasında daha fazla yakıt gönderilmesi gerekmekte ve bu durum da özgül yakıt tüketimini artırmaktadır. Literatürdeki birçok çalışmada da benzer sonuçlar elde edilmiştir (Zhang vd., 2021; Hasan vd., 2021; Wei vd., 2021). Tablo 1 incelendiğinde nanoparçacık takviyeli test yakıtının alt ısıl değerinin dizelden düşük M15

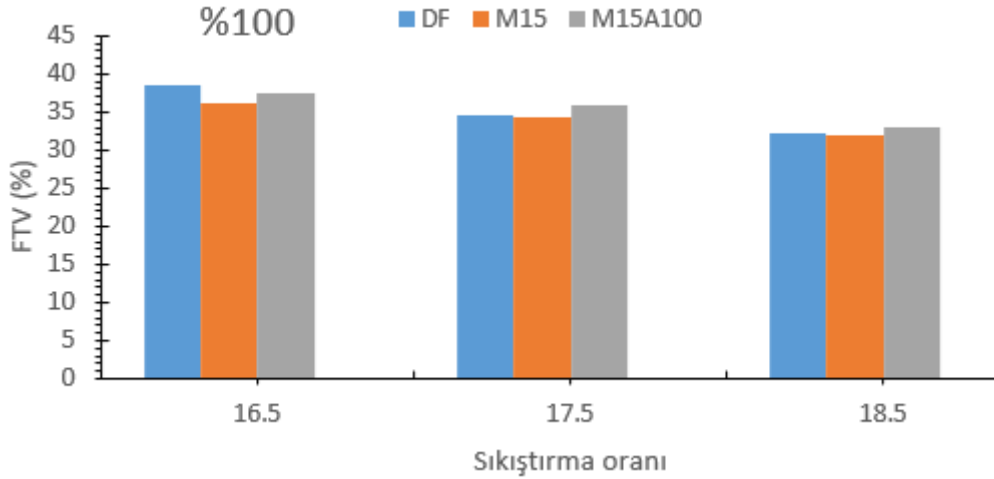
yakıtından ise az miktarda yüksek olduğu ve setan sayısının da M15 yakıtından yüksek olduğu görülmektedir. Bununla beraber nanoparçacıkların katalizör etkisi, yüksek yüzey alanı-hacim oranı gibi üstün özellikleri de nanoparçacık takviyeli test yakıtında (M15A100) ÖYT değerinin M15 yakıtına göre daha düşük olarak elde edilmesine sebep olmuştur. Ayrıca, yanma odasında metal oksit bazlı nanopartiküllerin mevcudiyeti, daha yüksek buharlaşma oranı, daha kısa tutuşma gecikme süresi ve iyileştirilmiş püskürtme özellikleri sağlamakta ve böylece yanma verimini arttırmakta olduğu literatürde birçok çalışmada ifade edilmiştir (Wei vd., 2021; Polat vd., 2022; Rajak vd., 2022; Ağbulut vd., 2022; Afzal vd., 2021).

3.2. Fren Termal Verimi (FTV)

3.2. Brake Thermal Efficiency (BTE)

Fren termal verimliliği (FTV), test edilen yakıttan elde edilen enerji verimliliğini ifade eder ve test yakıtlarının alt ısıl değerlerine büyük ölçüde

bağlıdır. Metanolün geleneksel dizel yakıtta eklenmesiyle, Şekil 5'te görüldüğü gibi metanolün daha düşük enerji içeriği nedeniyle FTV tüm sıkıştırma oranlarında azalma göstermiştir. Başka bir deyişle, M15 test yakıtı, geleneksel dizel yakıtı göre %2.53'lük bir azalma sergilemektedir. M15 test yakıtına nanopartiküllerin eklenmesi ise FTV'yi önemli bir düzeyde iyileştirmiştir. Başka bir deyişle, metanol ilavesiyle indirgenen FTV, nanopartiküllerin ilavesiyle arttırılmaktadır. M15A100 test yakıtındaki FTV'deki artış, M15 test yakıtına göre %3.88, dizel yakıtı göre ise %1.25 civarında elde edilmiştir. Şekil 5'ten de görüldüğü üzere FTV değeri, geleneksel dizel yakıttan bile daha iyidir. Nanopartiküllerin eklenmesiyle bu iyileştirmenin nedeni, aktif katalizör rolüne ve üstün termal özelliklerine atfedilebilir. Ayrıca, karışımlardaki nanopartiküllerin, enerjinin depolanması ve reaktivite üzerinde olumlu bir etkiye sahip olan hacim/yüzey alanı oranını da arttırıyor olmaları, bu durumun sebepleri arasında gösterilebilir (Shaafi & Velraj, 2015; Raju vd., 2018; Sheikholeslami vd., 2020; Sun vd., 2019).



Şekil 5. Tam yükte farklı sıkıştırma oranlarında test yakıtları için FTV değerleri
Figure 5. BTE values for test fuels at different compression ratios under full load

FTV değeri genel olarak ÖYT değeri ile ters orantı gösterir ve yüksek yakıt tüketimi düşük verim anlamına gelmektedir. Şekil 5 incelendiğinde sıkıştırma oranı arttıkça FTV değerinin azalış trendini sergilediği görülmektedir. Bunun sebebi olarak bir önceki bölümde bahsedilen vuruntu olayı gösterilebilir. Vuruntudan dolayı oluşan sürtünmeyi yenmek için motor ekstra güç harcamakta ve bu durum da performansta düşmeye neden olmaktadır (Wang vd., 2002; Bhattacharyya, 2000; Chen vd., 2020).

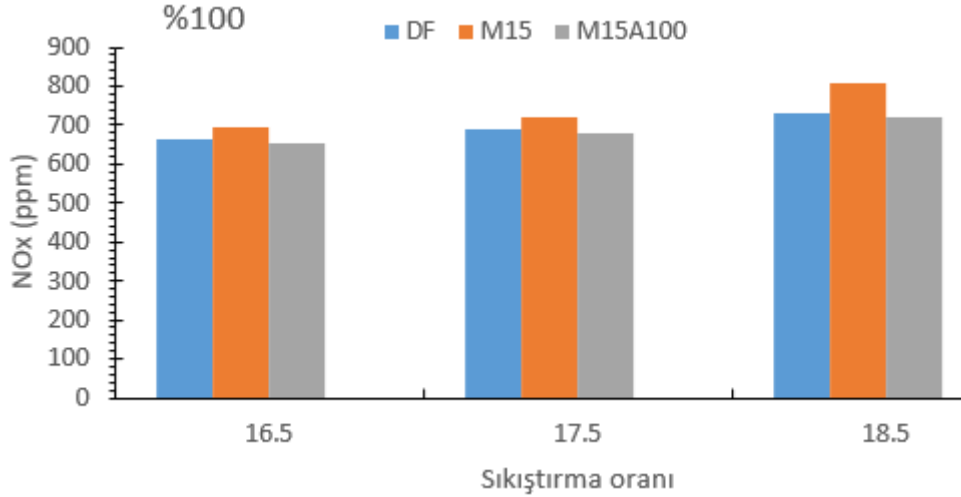
3.3. NOx Emisyon Değerleri

3.3. NOx Emission Values

NOx emisyonları çevre kirliliği ve ozon tabakasına verdiği zarar göz önüne alındığında yakıt çalışmalarında incelenmesi gereken en önemli noktalardan biridir. Bir içten yanmalı motorda, NOx oluşumu çoğunlukla yanma sıcaklığından ve ısı salınım hızından etkilenir. Bu nedenle motorlarda daha yüksek yanma sıcaklıkları daha yüksek NOx emisyonlarına neden olur. Şekil 6 farklı sıkıştırma oranlarına göre tam yükte test yakıtlarının sebep olduğu NOx miktarlarının değişimini göstermektedir. Silindiri içi NOx üretimi

hem havada hem de yakıtta bulunan oksijen ve nitrojen molekülleri arasındaki etkileşimin kimyasal kinetiği tarafından yönetilir. Kimyasal kinetik hızı, reaksiyon sıcaklığına, moleküler konsantrasyonlara ve kalma süresine bağlıdır. Sıkıştırma oranındaki artış yanma sıcaklığının da

artmasına ve NO_x oluşum hızının da uyarılmasına sebep olmaktadır (Tangöz vd., 2015; Lim vd., 2013; Hawi vd., 2019; Sayın & Gümüş, 2011). Bundan dolayı da Şekil 6'dan da görüleceği üzere sıkıştırma oranı arttıkça tüm test yakıtları için NO_x değeri artmıştır.



Şekil 6. Tam yükte farklı sıkıştırma oranlarında test yakıtları için NO_x değerleri
Figure 6. NO_x values for test fuels at different compression ratios under full load

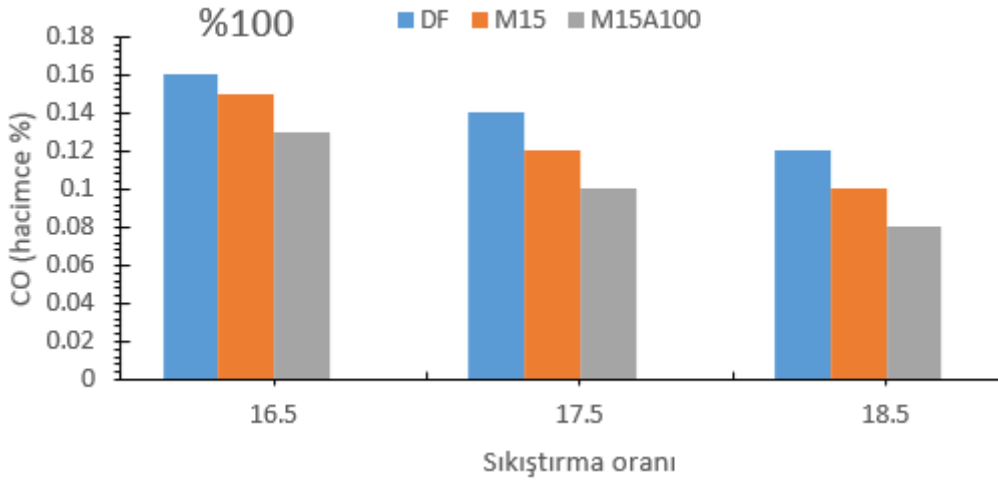
NO_x miktarı çoğunlukla silindir içi sıcaklığa ve yakıtın oksijen konsantrasyonuna bağlıdır. Metanol ağırlıkça %50 oksijen içerir ve Tablo 1'den de görüldüğü üzere setan sayısı dizel yakıtından daha düşüktür. Tüm bunlar yanma sonrası silindir içi sıcaklığı artırmasına sebep olmaktadır. Yüksek sıcaklıkta, nitrojen NO_x emisyonuna dönüştürülür ve diatomik nitrojen (N₂), oldukça reaktif olan monoatomik nitrojene (N) dönüşür. Öte yandan, yanma işlemi sırasında yakıtla bağlı nitrojenin (yakıt eser miktarda NH₃, NC ve HCN içerir) NO_x'e dönüştürülmesi nedeniyle de NO_x üretilmiş olur. Tüm bunlar göz önüne alındığında NO_x miktarının artması beklenen bir durum olarak ortaya çıkmaktadır (Chen vd., 2019; Yasin vd., 2014; Garcia vd., 2021). Şekil 6'dan da görüldüğü üzere metanol ilavesiyle tüm sıkıştırma oranlarında NO_x miktarı artış göstermiştir. Yine Şekil 6 incelendiğinde, dizel-metanol yakıt karışımına alüminyum oksit nanoparçacığının ilave edilmesiyle NO_x emisyonlarının saf dizelden daha iyi seviyelere düştüğü görülmektedir. Bu durumun altında yatan temel sebep, nanopartikül ilavesiyle yakıtların termal özelliklerinin iyileştirilmesidir. Termal özelliklerin iyileşmesiyle de hızlı bir ısı transferi sağlanmış ve bu sayede de yanma odasındaki sıcaklığın çok fazla yükselmesine izin verilmemiştir. Diğer bir deyişle, NO_x emisyonunun artması için gereken yüksek sıcaklıklara çok fazla ulaşamamış ve nanopartikül

katkılı test yakıtında (M15A100) NO_x emisyonunun daha az olduğu görülmüştür. Aşağıdaki referanslar tarafından da benzer sonuçlar bildirilmiştir (Ağbulut vd., 2020; Karagöz vd., 2021; Gharehghani vd., 2019; Venkatesan vd., 2019; Elwardany vd., 2020).

3.4. CO Emisyon Değerleri

3.4. CO Emission Values

CO emisyonu, hava/akış oranı, test yakıtlarının oksijen ve karbon içerikleri, enjeksiyon stratejileri, enjeksiyon zamanlaması, yanma odası şekli vb. gibi birçok parametreyle güçlü bir şekilde ilişkilidir (Ağbulut vd., 2021; Ağbulut vd., 2020; Sarıdemir vd., 2020). CO eksik yanma ürünüdür. Yani CO emisyonunun varlığı, oksitlenemeyen ve/veya kısmen oksitlenebilen yakıtın bir yansıması olup ilgili yakıt için kimyasal enerji kaybı hakkında fikir verebilir. Şekil 7 tam yükte farklı sıkıştırma oranlarında test yakıtlarının CO değerlerini göstermektedir. Şekil incelendiğinde herhangi bir sıkıştırma oranında en yüksek CO emisyon değerinin dizel yakıtta meydana geldiği görülmektedir. Bunun arkasındaki neden, geleneksel dizel yakıtın oksijen içeriğine atfedilebilir. Hiçbir katkı maddesi içermeyen dizel yakıt, doğal yapısında herhangi bir oksijen atomuna sahip değildir. Bu nedenle, sahip olduğu yüksek karbon içeriği, oksijen atomlarının eksikliği ile oksitlenemez ve CO emisyonu artar.



Şekil 7. Tam yükte farklı sıkıştırma oranlarında test yakıtları için CO değerleri
Figure 7. CO values for test fuels at different compression ratios under full load

Dizel yakıtta metanol eklenmesiyle, M15 test yakıtı için CO emisyon seviyesinin azaldığı görülmektedir. Bunun nedeni ise metanolde bol miktarda oksijen atomunun bulunması ve bu sayede de daha eksiksiz bir yanma sağlanmasıdır. Öte yandan, M15 test yakıtına metal oksit bazlı nanopartiküllerin eklenmesiyle elde edilen M15A100 yakıtında, CO emisyonu dizel ve M15 test yakıtlarına göre daha düşüktür. Bunun nedeni ise, nanopartiküllerin oksijen veren katalizör görevi görmesi ve böylece yanma odasında oksidasyona yardımcı olmasıdır. Ek olarak, nanoparçacıkların daha yüksek yüzey/hacim oranı kimyasal reaktiviteyi artırır ve tutuşma gecikme süresini kısaltır, bu da daha eksiksiz yanma ve daha az CO emisyonu ile sonuçlanır (Ağbulut vd., 2021; Ağbulut vd., 2020; Sarıdemir vd., 2020). Ayrıca Şekil 7’de görüldüğü üzere sıkıştırma oranının artmasıyla CO emisyonları düşüş eğilimi göstermektedir. Bu eğilimin olası nedeni ise, artan sıkıştırma oranının silindir içindeki hava sıcaklığını artırarak ateşleme gecikmesini azaltması ve yakıtın daha iyi ve daha eksiksiz yanmasına sebep olmasıdır (Prasad vd., 2021; Sayın & Gümüş, 2011).

4. Sonuç ve öneriler

4. Conclusion and recommendations

Bu çalışmada tek silindirli bir dizel motorun performans ve emisyon karakteristikleri üzerine sıkıştırma oranının etkisini incelemek üzere Diesel RK yazılımı kullanılarak modelleme ve analiz çalışmaları yapılmıştır. Öncelikle 3 farklı yakıt (DF, M15 ve M15A100) spesifik özelliklerine göre modellenmiş ve test motorunun katalog değeri olan 17.5 sıkıştırma oranında dizel yakıt için alınan sonuçlar literatürdeki aynı koşullar altında yapılan

deneysel çalışmayla doğrulanmış ve modelin maksimum 6.5 hatayla çalıştığı ispat edilmiştir. Analizler 1500 rpm sabit motor devrinde tam yükte gerçekleştirilmiştir.

Dizel yakıtın özgül yakıt tüketiminin tüm sıkıştırma oranlarında en düşük olduğu görülmüştür. Sıkıştırma oranı arttıkça tüm yakıtlar için ÖYT değeri de artmıştır. En düşük ÖYT değeri 16.5 sıkıştırma oranında 219 g/kWh olarak dizel yakıtta elde edilmiştir. Bununla beraber dizel yakıtta metanol ilavesinin ÖYT değerini artırdığı ve nanopartikül ilavesinin bu artışı geriye çekmede önemli rol oynadığı da bu çalışmanın çıktıları arasında gösterilebilir. Başka bir deyişle, tam yükte tüm sıkıştırma oranları hesaba katıldığında ÖYT değeri dizel yakıtı göre M15 ve M15A100 yakıtlarında sırasıyla %10.77 ve %6.35 oranında artış göstermiştir.

Tam yükte tüm test yakıtlarında sıkıştırma oranı arttıkça FTV değerinin azalış trendi sergilediği görülmüştür. Ayrıca dizel yakıtta metanol eklenmesiyle elde edilen M15 test yakıtında, geleneksel dizel yakıtı göre FTV değeri %2.53'lük bir azalma sergilemiştir. Bu yakıtta nanopartikül eklenmesi ise FTV'yi önemli bir düzeyde iyileştirmiş ve M15 test yakıtına göre %3.88, dizel yakıtı göre ise %1.25 civarında artış elde edilmiştir.

ÖYT değerlerine benzer trend NOx emisyonlarında da görülmüş ve sıkıştırma oranı arttıkça tüm yakıtlar için NOx değerlerinin arttığı gözlemlenmiştir. Ayrıca metanol ilavesinin de NOx emisyonlarının artmasına sebep olduğu görülmüştür. Bununla beraber dizel-metanol yakıt karışımına alüminyum oksit nanoparçacığının

ilave edilmesiyle NOx emisyonlarının saf dizelden daha iyi seviyelere düştüğü gözlemlenmiştir. Buna göre minimum NOx değeri 651 ppm ile M15A100 yakıtında 16.5 sıkıştırma oranında elde edilmiştir. Sonuçlara bakıldığında, tam yükte tüm sıkıştırma oranları hesaba katıldığında NOx değerinin dizel yakıtına göre M15 yakıtında %6.57 oranında artış gösterirken, M15A100 yakıtında %1.58 oranında azaldığı görülmektedir.

Tüm sıkıştırma oranlarında en yüksek CO emisyon değerinin dizel yakıtta meydana geldiği görülmüştür. Dizel yakıtta metanol eklenmesi, CO emisyon seviyesini düşürmüş, ayrıca nanopartikül ilavesi ise CO emisyonunda ekstra bir düşüş sağlamıştır. Başka bir deyişle, dizel yakıtına göre M15 ve M15A100 test yakıtlarında CO emisyon değeri sırasıyla %11.9 ve %26.19 oranında düşmüştür.

Çalışma verileri gözlemlendiğinde Diesel RK yazılımıyla deneysel sonuçlara çok yakın değerler elde edildiği açıkça görülmektedir. Bu tarz yazılımlar sayesinde araştırmacılar hem ciddi vakit alan hem de oldukça maliyetli olan deneysel çalışmalardan ziyade bilgisayar üzerinde çalışılmak istenen konunun ön araştırmasını kolaylıkla yapabileceklerdir. Bunun için ise öncelikle tecrübe sonrasında da modellenmek istenen deneysel düzeneğin gerçekte bire bir olarak kurgulanması gerekmektedir. Fakat unutulmamalıdır ki oluşturulan model mutlaka bir deneysel çalışma ile doğrulanmalıdır.

Yazar katkısı

Author contribution

Bu makaledeki tüm katkı yazara aittir.

Etik beyanı

Declaration of ethical code

Bu makalenin yazarları, bu çalışmada kullanılan materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel izin gerektirmediğini beyan etmektedir.

Çıkar çatışması beyanı

Conflicts of interest

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Kaynaklar

References

Al-Dawody, M. F. & Bhatti, S. K. (2011). Effect of soybean oil biofuel blending on the performance and emissions of Diesel engine using Diesel-RK

software. *International journal of engineering science and technology*, 3(6), 4539-4555.

Afzal, A., Ağbulut, Ü., Soudagar, M. E. M., Razak, R. K., Buradi, A. & Saleel, C. A. (2021). Blends of scum oil methyl ester, alcohols, silver nanoparticles and the operating conditions affecting the diesel engine performance and emission: an optimization study using Dragon fly algorithm. *Applied Nanoscience*, 11(9), 2415-2432. <https://doi.org/10.1007/s13204-021-02046-5>

Ağbulut, Ü., Elibol, E., Demirci, T., Sarıdemir, S., Gürel, A. E., Rajak, U., & Verma, T. N. (2022). Synthesis of graphene oxide nanoparticles and the influences of their usage as fuel additives on CI engine behaviors. *Energy*, 122603. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.122603>

Ağbulut, Ü., Polat, F. & Sarıdemir, S. (2021). A comprehensive study on the influences of different types of nano-sized particles usage in diesel-bioethanol blends on combustion, performance, and environmental aspects. *Energy*, 229, 120548. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120548>

Ağbulut, Ü., Karagöz, M., Sarıdemir, S. & Öztürk, A. (2020). Impact of various metal-oxide based nanoparticles and biodiesel blends on the combustion, performance, emission, vibration and noise characteristics of a CI engine. *Fuel*, 270, 117521. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.117521>

Ahmad, T. & Zhang, D. (2020). A critical review of comparative global historical energy consumption and future demand: The story told so far. *Energy Reports*, 6, 1973-1991. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2020.07.020>

Atmanli, A. & Yilmaz, N. (2020). An experimental assessment on semi-low temperature combustion using waste oil biodiesel/C3-C5 alcohol blends in a diesel engine. *Fuel*, 260, 116357. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.116357>

Bahadır, A., Yegin, M. & Polat, F. (2016). Renewable energy policies in Turkey: a case of Bioenergy. *Journal of Engineering Research and Applied Science*, 5(2), 451-457.

Balan, K. N., Yashvanth, U., Booma Devi, P., Arvind, T., Nelson, H. & Devarajan, Y. (2019). Investigation on emission characteristics of alcohol biodiesel blended diesel engine. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 41(15), 1879-1889. <https://doi.org/10.1080/15567036.2018.1549166>

Banapurmath, N. R., Budzianowski, W. M., Basavarajappa, Y. H., Hosmath, R. S., Yaliwal, V. S. & Tewari, P. G. (2014). Effects of

- compression ratio, swirl augmentation techniques and ethanol addition on the combustion of CNG–biodiesel in a dual-fuel engine. *International Journal of Sustainable Engineering*, 7(1), 55-70. <https://doi.org/10.1080/19397038.2013.798712>
- Bhattacharyya, S. (2000). Optimizing an irreversible Diesel cycle—fine tuning of compression ratio and cut-off ratio. *Energy conversion and management*, 41(8), 847-854. [https://doi.org/10.1016/S0196-8904\(99\)00153-3](https://doi.org/10.1016/S0196-8904(99)00153-3)
- Chen, H., Su, X., He, J. & Xie, B. (2019). Investigation on combustion and emission characteristics of a common rail diesel engine fueled with diesel/n-pentanol/methanol blends. *Energy*, 167, 297-311. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.10.199>
- Chen, L., Wei, H., Pan, J., Liu, C. & Shu, G. (2020). Understanding the correlation between auto-ignition, heat release and knocking characteristics through optical engines with high compression ratio. *Fuel*, 261, 116405. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.116405>
- Çeçen, M., Yavuz, C., Tirmikçi, C. A., Sarıkaya, S. & Yanıkoğlu, E. (2022). Analysis and evaluation of distributed photovoltaic generation in electrical energy production and related regulations of Turkey. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 1-16. <https://doi.org/10.1007/s10098-021-02247-0>
- Çılgin, E. (2021). Investigation of the usability of essential oils in diesel engines as a new biodiesel source. *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 11(2), 573-585.
- Datta, A. & Mandal, B. K. (2016). Effect of compression ratio on the performance, combustion and emission from a diesel engine using palm biodiesel. In *AIP Conference Proceedings (Vol. 1754, No. 1, p. 050005)*. AIP Publishing LLC.
- Devaraj, A., Nagappan, M. & Yogaraj, D. (2021). Emission pattern of higher alcohol-biodiesel blends in compression ignition engine. *Materials Today: Proceedings*, 37, 1876-1879. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.07.455>
- Dhahad, H. A. & Chaichan, M. T. (2020). The impact of adding nano- Al₂O₃ and nano-ZnO to Iraqi diesel fuel in terms of compression ignition engines' performance and emitted pollutants. *Thermal Science and Engineering Progress*, 18, 100535. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2020.100535>
- Dong, K., Dong, X. & Jiang, Q. (2020). How renewable energy consumption lower global CO2 emissions? Evidence from countries with different income levels. *The World Economy*, 43(6), 1665-1698. <https://doi.org/10.1111/twec.12898>
- Elwardany, A. E., Marei, M. N., Eldrainy, Y., Ali, R. M., Ismail, M. & El-Kassaby, M. M. (2020). Improving performance and emissions characteristics of compression ignition engine: effect of ferrocene nanoparticles to diesel-biodiesel blend. *Fuel*, 270, 117574. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.117574>
- Emiroğlu, A. O. & Şen, M. (2018). Combustion, performance and exhaust emission characterizations of a diesel engine operating with a ternary blend (alcohol-biodiesel-diesel fuel). *Applied Thermal Engineering*, 133, 371-380. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.01.069>
- Fidan, M. S. & Alkan, E. (2014). Bitkisel hammaddelerden elde edilen biyodizelin alternatif enerji kaynağı olarak kullanılması. *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 4(2), 144-160.
- Garcia, A., Monsalve-Serrano, J., Villalta, D. & Guzman-Mendoza, M. (2021). Methanol and OME_x as fuel candidates to fulfill the potential EURO VII emissions regulation under dual-mode dual-fuel combustion. *Fuel*, 287, 119548. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.119548>
- Gharehghani, A., Asiaei, S., Khalife, E., Najafi, B. & Tabatabaei, M. (2019). Simultaneous reduction of CO and NO_x emissions as well as fuel consumption by using water and nano particles in Diesel–Biodiesel blend. *Journal of cleaner production*, 210, 1164-1170. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.10.338>
- Hariram, V. & Shangar, R. V. (2015). Influence of compression ratio on combustion and performance characteristics of direct injection compression ignition engine. *Alexandria Engineering Journal*, 54(4), 807-814. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2015.06.007>
- Hasan, A. O., Osman, A. I., Ala'a, H., Al-Rawashdeh, H., Abu-jrai, A., Ahmad, R., & Rooney, D. W. (2021). An experimental study of engine characteristics and tailpipe emissions from modern DI diesel engine fuelled with methanol/diesel blends. *Fuel Processing Technology*, 220, 106901. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2021.106901>
- Hawi, M., Elwardany, A., Ookawara, S. & Ahmed, M. (2019). Effect of compression ratio on performance, combustion and emissions characteristics of compression ignition engine fueled with jojoba methyl ester. *Renewable Energy*, 141, 632-645. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.04.041>

- Jaichandar, S., Jaichandar, S., Annamalai, K., Annamalai, K., Elango, V. & Arikaran, P. Effects of varying the compression ratio on the performance of a biodiesel fuelled diesel engine. *International Journal of Automotive Engineering and Technologies*, 3(3), 103-110.
- Joy, N., Balan, K. N., Nagappan, B. & Justin Abraham Baby, S. (2020). Emission analysis of diesel and butanol blends in research diesel engine. *Petroleum Science and Technology*, 38(4), 289-296. <https://doi.org/10.1080/10916466.2019.1702680>
- Karagöz, M. (2020). Investigation of performance and emission characteristics of an CI engine fuelled with diesel–waste tire oil–butanol blends. *Fuel*, 282, 118872. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.118872>
- Karagoz, M., Uysal, C., Agbulut, U. & Saridemir, S. (2021). Exergetic and exergoeconomic analyses of a CI engine fuelled with diesel-biodiesel blends containing various metal-oxide nanoparticles. *Energy*, 214, 118830. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.118830>
- Lim, G., Lee, S., Park, C., Choi, Y. & Kim, C. (2013). Effects of compression ratio on performance and emission characteristics of heavy-duty SI engine fuelled with HCNG. *International journal of hydrogen energy*, 38(11), 4831-4838. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2013.01.188>
- Mahmudul, H. M., Hagos, F. Y., Mamat, R., Adam, A. A., Ishak, W. F. W. & Alenezi, R. (2017). Production, characterization and performance of biodiesel as an alternative fuel in diesel engines– A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 72, 497-509. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.01.001>
- Manigandan, S., Sarweswaran, R., Devi, P. B., Sohret, Y., Kondratiev, A., Venkatesh, S., ... & Joshua, J. J. (2020). Comparative study of nanoadditives TiO₂, CNT, Al₂O₃, CuO and CeO₂ on reduction of diesel engine emission operating on hydrogen fuel blends. *Fuel*, 262, 116336. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.116336>
- Nguyen, T., Pham, M. & Le Anh, T. (2020). Spray, combustion, performance and emission characteristics of a common rail diesel engine fueled by fish-oil biodiesel blends. *Fuel*, 269, 117108. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.117108>
- Özener, O. (2019). An assessment of real-world driving emissions and fuel consumption of a diesel bus with using a portable emissions and fuel consumption measurement system: İstanbul bus rapid transit-metrobus. *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 9(3), 515-525.
- Paul, A., Panua, R. & Debroy, D. (2017). An experimental study of combustion, performance, exergy and emission characteristics of a CI engine fuelled by Diesel-ethanol-biodiesel blends. *Energy*, 141, 839-852. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.09.137>
- Polat, F., Yeşilyurt, M. K., Ağbulut, Ü., Karagöz, M. & Saridemir, S. (2022). Experimental assessment of the influences of liquid-solid-gas fuel blends on DI-CI engine behaviors. *Process Safety and Environmental Protection*, 159, 511-524. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2022.01.024>
- Prasad, K. S., Rao, S. S. & Raju, V. R. K. (2021). Effect of compression ratio and fuel injection pressure on the characteristics of a CI engine operating with butanol/diesel blends. *Alexandria Engineering Journal*, 60(1), 1183-1197. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2020.10.042>
- Rajak, U., Nashine, P., Verma, T. N. & Pugazhendhi, A. (2019). Performance, combustion and emission analysis of microalgae Spirulina in a common rail direct injection diesel engine. *Fuel*, 255, 115855. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.115855>
- Rajak, U., Ağbulut, Ü., Veza, I., Dasore, A., Saridemir, S. & Verma, T. N. (2022). Numerical and experimental investigation of CI engine behaviours supported by zinc oxide nanomaterial along with diesel fuel. *Energy*, 239, 122424. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.122424>
- Raju, V. D., Kishore, P. S., Nanthagopal, K. & Ashok, B. (2018). An experimental study on the effect of nanoparticles with novel tamarind seed methyl ester for diesel engine applications. *Energy Conversion and Management*, 164, 655-666. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.03.032>
- Sajith, V., Sobhan, C. B. & Peterson, G. P. (2010). Experimental investigations on the effects of cerium oxide nanoparticle fuel additives on biodiesel. *Advances in Mechanical Engineering*, 2, 581407. <https://doi.org/10.1155%2F2010%2F581407>
- Sarıdemir, S., Polat, F. & Kılınçel, M. (2016). Motor devir ve yükünün titreşim ve gürültü emisyonuna olan etkisinin incelenmesi. *El-Cezeri Journal of Science and Engineering*, 3(3), 459-466.
- Sarıdemir, S., Gürel, A. E., Ağbulut, Ü. & Bakan, F. (2020). Investigating the role of fuel injection pressure change on performance characteristics of a DI-CI engine fuelled with methyl ester. *Fuel*, 271, 117634. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.117634>
- Sayin, C. & Gumus, M. (2011). Impact of compression ratio and injection parameters on the performance and emissions of a DI diesel engine

- fueled with biodiesel-blended diesel fuel. *Applied thermal engineering*, 31(16), 3182-3188. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2011.05.044>
- Shaafi, T. & Velraj, R. (2015). Influence of alumina nanoparticles, ethanol and isopropanol blend as additive with diesel-*soybean biodiesel blend fuel: combustion, engine performance and emissions. Renewable Energy*, 80, 655-663. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.02.042>
- Sheikholeslami, M., Keshteli, A. N. & Babazadeh, H. (2020). Nanoparticles favorable effects on performance of thermal storage units. *Journal of Molecular Liquids*, 300, 112329. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2019.112329>
- Singh, R., Singh, S. & Kumar, M. (2020). Impact of n-butanol as an additive with eucalyptus biodiesel-diesel blends on the performance and emission parameters of the diesel engine. *Fuel*, 277, 118178. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.118178>
- Simsek, D., Vural, E., Ozer, S. & Colak, N. Y. (2017). Model analysis of the effect of ethanol blended diesel fuels in diesel engines on ignition delay and combustion. *International Journal of Scientific Research in Science and Technology*, 3(4), 47-54.
- Soni, D. K. & Gupta, R. (2017). Application of nano emulsion method in a methanol powered diesel engine. *Energy*, 126, 638-648. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.03.049>
- Soudagar, M. E. M., Mujtaba, M. A., Safaei, M. R., Afzal, A., Ahmed, W., Banapurmath, N. R., ... & Taqui, S. N. (2021). Effect of Sr@ ZnO nanoparticles and Ricinus communis biodiesel-diesel fuel blends on modified CRDI diesel engine characteristics. *Energy*, 215, 119094. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.119094>
- Sun, M., Dong, H., Dougherty, A. W., Lu, Q., Peng, D., Wong, W. T., & Yan, C. H. (2019). Nanophotonic energy storage in upconversion nanoparticles. *Nano Energy*, 56, 473-481. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2018.11.086>
- Tangöz, S., Akansu, S. O., Kahraman, N. & Malkoç, Y. (2015). Effects of compression ratio on performance and emissions of a modified diesel engine fueled by HCNG. *International Journal of Hydrogen Energy*, 40(44), 15374-15380. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.02.058>
- Venkatesan, E. P., Kandhasamy, A., Sivalingam, A., Kumar, A. S., Ramalingam, K., James Thadhani Joshua, P. & Balasubramanian, D. (2019). Performance and emission reduction characteristics of cerium oxide nanoparticle-water emulsion biofuel in diesel engine with modified coated piston. *Environmental Science and Pollution Research*, 26(26), 27362-27371.
- Venu, H., Raju, V. D., Lingesan, S. & Soudagar, M. E. M. (2021). Influence of Al₂O₃ nano additives in ternary fuel (diesel-biodiesel-ethanol) blends operated in a single cylinder diesel engine: performance, combustion and emission characteristics. *Energy*, 215, 119091. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.119091>
- Wang, W., Chen, L., Sun, F. & Wu, C. (2002). The effect of friction on the performance of an air standard dual cycle. *Exergy An International Journal*, 2(4), 340-344. [https://doi.org/10.1016/S1164-0235\(02\)00067-5](https://doi.org/10.1016/S1164-0235(02)00067-5)
- Wei, J., Yin, Z., Wang, C., Lv, G., Zhuang, Y., Li, X. & Wu, H. (2021). Impact of aluminium oxide nanoparticles as an additive in diesel-methanol blends on a modern DI diesel engine. *Applied Thermal Engineering*, 185, 116372. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.116372>
- Yasin, M. M., Yusaf, T., Mamat, R. & Yusop, A. F. (2014). Characterization of a diesel engine operating with a small proportion of methanol as a fuel additive in biodiesel blend. *Applied Energy*, 114, 865-873. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.06.012>
- Zhang, Z., Tian, J., Li, J., Ji, H., Tan, D., Luo, J., & Cui, S. (2021). Effects of different mixture ratios of methanol-diesel on the performance enhancement and emission reduction for a diesel engine. *Processes*, 9(8), 1366.