



Düşük yük koşulları altında tek silindirli dizel bir motorun yanma ve emisyonlarının tolüen ilavesi ile değişiminin sayısal olarak incelenmesi

Numerical investigation of toluene addition and changes in combustion and emissions of a single cylinder diesel engine under low load conditions

Mutlu Okcu^{1*}, Müjdat Fırat²

¹ Ardahan Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, mutluokcu@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8226-0994>

² Fırat Üniversitesi, Otomotiv Mühendisliği Bölümü, mfirat@firat.edu.tr
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6978-9044>

MAKALE BİLGİLERİ

Makale Geçmişi:

Geliş 24 Kasım 2023
Revizyon 15 Şubat 2024
Kabul 21 Şubat 2024
Online 29 Mart 2024

Anahtar Kelimeler:

*Dizel motor,
Tolüen,
Sayısal modelleme,
Emisyon*

ÖZ

19. yüzyılın başından itibaren adım adım gelişen içten yanmalı motorlar, günümüzde insanoğlunun yaşamın tüm alanlarında etkin rol almaktadırlar. Özellikle dizel motorlar, yüksek verimleri nedeniyle birçok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu avantajına rağmen, dizel motorların çevre ve insan sağlığı açısından zararlı etkileri olan emisyonların azaltılması gibi çözmesi gereken problemleri mevcuttur. Yapılan çalışmada, dizel motorlarda motor performansında herhangi bir azalma olmadan zararlı emisyonların azaltılması amacıyla tolüen kullanılmıştır. Çalışmada dizel %10'dan %50'ye %10 artırılarak ilave edilen tolüenin motor performans ve emisyonlara etkisi sayısal olarak incelenmiştir. Bu çalışmada, test koşulları %20 sabit motor yükü ve 2400 d/d olarak belirlenmiştir. Sayısal çalışma için ANSYS Forte adlı paket programı kullanılmıştır. Elde edilen bulgulara göre, dizel içindeki tolüen oranının %40'a kadar artırılmasının tüm testlerde optimum olarak hem motor performansı hem de emisyonları üzerinde olumlu etkisi olmuştur. Özellikle %10 oranında tolüen kullanımında (T10) CO ve HC emisyonunda %61 ve %43 oranlarında azalma meydana gelirken, NOx emisyonunda %35 oranında artış olmuştur. Ayrıca motor performansı adına önemli olan termik verim ve OİB'nin de T10 kullanımında %8.5 ve %8 oranlarında arttığı belirlendi. Termik verim, OİB, CO ve HC emisyonlarında oldukça önemli sonuçların elde edildiği T10 yakıtının dizel motorların geleceği için önemli rol oynaması beklenmektedir.

ARTICLE INFO

Article history:

Received 24 November 2023
Received in revised form 15 February 2024
Accepted 21 February 2024
Available online 29 Mart 2024

Keywords:

*Diesel engine,
Toluene,
Numerical modeling,
Emissions.*

Doi: 10.24012/dumf.1395573

* Sorumlu Yazar

ABSTRACT

Internal combustion engines are developing step by step since the early nineteenth century, and they now play a key role in a variety of daily life. Diesel engines, in particular, are widely employed in numerous fields due to their great efficiency. Despite this advantage, diesel engines have problems that need to be solved such as reducing emissions, which have harmful effects on the environment and human health. In this study, toluene was used in diesel engines to reduce harmful emissions without any reduction in engine performance. In the presented study, the effect of toluene added to diesel with an increase of 10% from 10% to 50% on engine performance and emissions was investigated numerically. In this study, the test conditions were determined as 20% constant engine load and 2400 rpm. ANSYS Forte package program was used for the numerical study. According to the results obtained, increasing the toluene content in diesel up to 40% has a positive effect on both engine performance and emissions as optimum in all tests. Especially at 10% toluene content (T10), CO and HC emissions decreased by 61% and 43%, while NOx emissions increased by 35%. In addition, it was determined that thermal efficiency and IMEP, which are important for engine performance, increased by 8.5% and 8% when T10 was used. It is expected that T10 fuel, which has very important results in thermal efficiency, IMEP, CO and HC emissions, will play an important role for the future of diesel engines.

Giriş

Günümüzde sanayinin gelişmesi ile birlikte dizel motorların kullanımını oldukça yaygınlaştırmıştır. Bu çağda, dizel motorlar yüksek performansları ve dayanıklılıkları nedeniyle hâlâ ulaşım ve enerji üretimi sektörlerinde yoğun bir şekilde kullanılmaktadır. Bu yaygın kullanımlarına rağmen dizel motorlar, insan sağlığına ve çevreye zararlı nitrojen oksit (NO_x) ve partikül madde (PM) gibi önemli emisyonların oluşmasını da arttırdıkları bilinmektedir [1]. Ayrıca, artan enerji taleplerinin karşılanması ve bu taleplerin fosil yakıt kaynakları yoluyla giderilmesi gibi önemli dezavantajlarında dizel motorların baş etmesi gereken zorluklarının olduğu da bilinmektedir [2]. Bu avantaj ve dezavantajlarına rağmen dizel motorların yaygın kullanımlarının devam ettiği görülmektedir. Araştırmacıların, dizel motorlardan kaynaklanan zararlı emisyonların azaltılması için yoğun çalışmaları devam etmektedir. Literatürde yapılan incelemelerde, son yıllarda dizel motorlarda farklı enjeksiyon yöntemlerinin kullanıldığı ve özellikle alternatif yakıt çalışmalarının hız kazandığı tespit edilmiştir. Alternatif yakıtların veya başka bir deyişle fosil yakıt kökenli olmayan büyük oranda alkol kökenli veya biyo-yakıt olarak tarif edilen biyodizellerden oluştuğu gözlenmektedir. Bu çalışmalardan birinde Gürbüz ve arkadaşları, etanol gibi alternatif ve yenilenebilir bir yakıtın dizel motorlarda kullanımının incelendiği bir çalışma yapmışlardır. Yapılan bu çalışmada, dizel motorda etanolün kullanılması, hava kirliliğinde etkili olan NO_x ve partikül madde oranında azalma sağlamıştır. Ancak bu çalışmada CO, HC ve duman (FSN numarası) emisyonlarının önemli oranda arttığı bildirilmiştir [3]. Yapılan araştırmalarda, dizel motorlarda farklı oranlarda biyodizel kullanımının yaygın olduğu görülmektedir. Araştırmacıların, biyodizellerin düşük karışım oranlarında dizel motorlarda kullanılabilirliğinin faydalı olduğu ifade ettikleri çalışmalar mevcuttur [4]. Bununla birlikte, biyodizelin dizel yakıtı göre çevre dostu olması, oksijenli olması, toksik olmaması, setan sayısının yüksek olması ve biyolojik olarak parçalanabilir olması gibi birçok avantajı olduğu bilinmektedir [5]. Biyodizelin dizel motorda kullanımına yönelik yapılan bir çalışma Qenawy ve arkadaşları tarafından yapılmıştır. Yapılan bu çalışmada, dizel motorda kullanılan biyodizelin, HC ve duman değerlerinde azalış sağlamasına rağmen, CO, NO_x ve BTE değerlerinde azalma sağladığı bildirilmiştir [6]. Literatürde biyodizel ve alkollerin alternatif yakıt olarak kullanılmalarının avantajları olmasına rağmen yüksek oranda NO_x, CO ve düşük BTE değerleri gibi çözülmesi gereken zorluklarından da bahsedilmektedir. Dizel motorlarda emisyonların azaltılmasına yönelik olarak farklı enjeksiyon yöntemlerinin kullanıldığı çalışmalarında varlığında artış görülmektedir. Bu çalışmalar genel olarak düşük sıcaklıklı yanma yöntemleri (LTC) olarak ifade edilmektedir. Dizel motorlar için büyük sorun oluşturan zararlı emisyonların, LTC stratejisi ile azaltılabileceği ifade edilmektedir. LTC, kronolojik olarak HCCI (Homojen Yüksek Sıkıştırma-Ateşleme), PCCI (Ön Karışimli Şarj Sıkıştırma-Ateşleme) ve RCCI (Reaktivite Kontrollü Sıkıştırma-Ateşleme) konseptlerinden oluşmaktadır. Bu yöntemler ile NO_x ve duman emisyonlarında neredeyse sifıra yakın

değerler elde edilmesine rağmen, özellikle geniş çalışma aralıklarına ulaşamama, yanma aşamalarının kontrol edilememesi ve bazı kirlenici emisyonların (yanmamış HC'ler ve CO) azaltılamaması gibi sorunların devam ettiği görülmektedir [7].

Dizel motorlarından kaynaklanan zararlı emisyonların azaltılmasını hedefleyen birçok çalışma incelenmiştir. Yapılan bu incelemeye göre, her bir yöntemin avantajları kadar dezavantajlarının da olduğu belirlenmiştir. Örneğin, LTC konseptlerinde genel olarak HC ve CO emisyonunda artışların gözlemlendiği bildirilmektedir. Bu artışla birlikte LTC konseptlerinin dizel motorda kullanımı için bazı tasarımsal değişikliklerin de yapıldığı görülmüştür. Bu durumun ek maliyetler oluşturacağı değerlendirilmiştir. Ayrıca, alkol ve biyo kökenli yakıtların belirli oranlarda kullanılmalarının uygun olduğu görülmüştür. Ancak bu yakıtların kullanımında da yüksek viskozite, düşük ısı değeri gibi problemlerinin yanında, yüksek buharlaşma ısı değerlerinin HC ve CO emisyonunda artışların oluşması gibi hala çözülmesi gereken problemleri vardır [8], [9]. İncelenen çalışmalarda NO_x, duman, HC ve CO emisyonlarının genel olarak, yakıt atomizasyonu, viskozite, yanma sıcaklığı tutuşma gecikmesi, yakıtın oksijen/karbon oranı ve setan sayısı gibi temel parametreler bağlı olarak kontrol edilebildiği görülmüştür.

Bu veriler de göz önüne alındığında, yapılan çalışmada dizel motorlardan kaynaklanan zararlı emisyonların optimum seviyede azalmasını yanında motor performansında da azalma olmaması amaçlanmıştır. Bu sebeple, yapılan çalışmada dizel motorlarda tolüen kullanmanın avantajları araştırılmıştır. Tolüen dizelere göre çok daha düşük viskozite, düşük karbon/oksijen oranı ve daha iyi bir hava/yakıt oranı sağlaması [10] ile hem motor performansı hem de emisyonlarda önemli pozitif etkilerinin olacağı bir yakıt olarak ön plana çıkmıştır. Özellikle düşük yüklerde soğuk çalışma şartlarında üretilen CO ve HC emisyonlarının azaltılmasında etkili olması beklenmektedir.

Materyal ve Metot

Sayısal çalışma, ANSYS Forte sayısal paket programı kullanılarak yapılmıştır. İlk olarak ANSYS Workbench bölümünde model uygun ağ yapısına bölünmüştür (model 100 bin adet elemana sahiptir). Daha sonra, kapsamlı kimyasal kinetikleri ve çeşitli yakıt kimyalarını hesaba katmak için CHEMKIN ANSYS ile birlikte kullanılmıştır. Yapılan çalışmada yakıtlar temsili olarak kimyasal kütüphanenin verdiği imkânlarda faydalanılarak oluşturulmuştur. Buna göre, ilave yakıt olarak kullanılan tolüen (C₆H₆) ve dizel olarak n-heptan (C₇H₁₆) kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan motora ait özellikler ve sayısal analizde kullanılan yakıtların özellikleri Tablo 1 ve Tablo 2'de gösterilmektedir.

Sayısal çalışmalarda yanma analizi büyük ölçüde kullanılan motor modelinin geometrisinin doğruluğuna bağlıdır. Bu sebeple, sayısal paket programında kullanılan model gerçek motorun modellenmesi ile elde edilmiştir. Bu modelde emme ve egzoz portları da dâhil olmak üzere eksiksiz bir motor modeli kullanılmıştır. Sayısal çalışmalarda

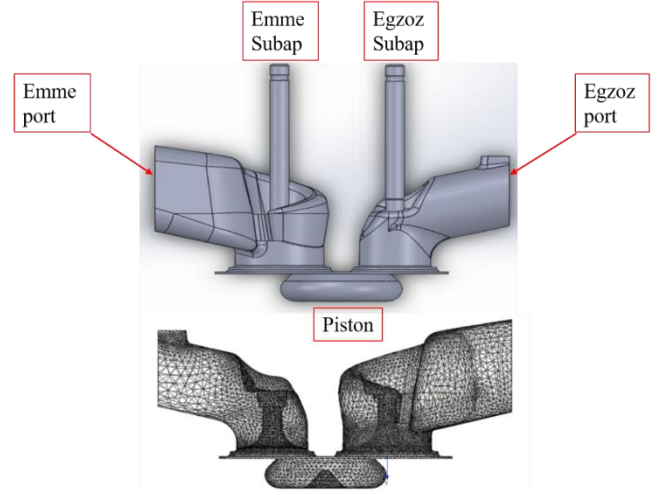
kullanılmak üzere tek silindirli bir dizel motora ait parçalar 3 boyutlu tarayıcı ile taranarak 3 boyutlu geometrik veriler elde edilmiştir. Tarama işlemi sonunda gerçek modelin birebir ve 3 boyutlu katı modeli elde edilerek sayısal çalışmalarda kullanılmıştır. Şekil 1’de gerçek modelden elde edilen motor modeline ait görseller mevcuttur.

Tablo 1. Sayısal çalışmada kullanılan motorun teknik özellikleri.

Güç (3000 d/d)	7.4kW
Silindir sayısı	1
Maksimum tork (2400 d/d)	25.7Nm
Yakıt enjeksiyon basıncı	300 bar
Silindir hacmi	0.406 L
ÇapxStrok	86x70 mm
Sıkıştırma oranı	18.1:1

Tablo 2. Çalışmada kullanılan yakıtların termofiziksel özellikleri [11], [12]

Parametre	Dizel	Tolüen
Yoğunluk (kg/m³)	829.4	865
Kaynama noktası (°C)	180-350	110.8
Parlama noktası (°C)	67	9
Viskozite (mm²/s)	2.889	0.6
Alt ısıl değer (MJ/kg)	43.14	40.9
Buharlaşma gizli ısısı (kJ/kg)	358	-
Kendiliğinden tutuşma sıcaklığı (°C)	210-250	-
Karbon içeriği (%)	80.13	-
Hidrojen içeriği (%)	12.86	-
Oksijen içeriği (%)	6.35	-
Oktan sayısı	-	120
Setan sayısı	56	9



Şekil 1. Sayısal çalışmada kullanılan model

Çalışmada ilk olarak dizel olarak ifade edilen ve Türkiye’de ticari satışı yapılan yakıt özellikleri kullanılmıştır. Daha sonra hacimsel olarak dizel yakıtına sırasıyla %10, %20, %30, %40 ve %50 oranlarında tolüen eklenmiştir. Tolüenin termo-fiziksel özelliği ANSYS Forte programının sağladığı ve literatürde belirtilen özelliklerden oluşmaktadır. Yapılan sayısal çalışmada tolüen ilave oranı, %50 tolüen eklenmesinden sonra motorda yanmanın kararsız bir hal alması nedeniyle %10-%50 aralığındaki oranlarda dizele eklenmiştir. Sayısal çalışmada maksimum tork devri olan 2400 d/d seçilmiş ve %20 sabit motor yükünde gerçekleştirilmiştir. Elde edilen veriler iki aşamada değerlendirilmiştir. Motor performansı hakkında bilgiler verdiği düşünülen, silindir içi basınç, ısı salınım oranı (HRR), maksimum silindir sıcaklığı, tutuşma gecikmesi-yanma süresi ve termik verim-OİB gibi veriler ilk bölümü, CO, EINO_x ve HC emisyonları da motor emisyonlarını değişimini içeren ikinci bölümü oluşturmuştur. Elde edilen sayısal sonuçlardan termik verim ve ortalama indike basınç hesaplanmasının Forte’nin kullandığı denklemlere göre belirlenmiştir. Termik verim ve OİB için kullanılan denklemler aşağıda verilmiştir.

$$\eta_{\text{termik verim}} = \frac{W}{m_{\text{yakıt}} \cdot LHW_{\text{yakıt}}} \quad (1)$$

Burada W işi, $m_{\text{yakıt}}$ yakıtın toplam kütesini ve $LHW_{\text{yakıt}}$ yakıtın alt ısıl değerini ifade etmektedir. OİB denklem 2 ye göre hesaplanmaktadır.

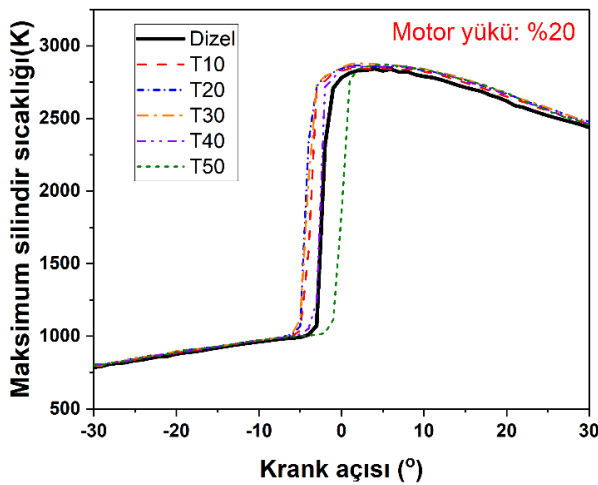
$$OİB = \frac{W}{V_{\text{yer}}} \quad (2)$$

Burada W işi, V_{yer} ise yer değiştirme hacmini ifade etmektedir. V_{yer} , kesit alanı*strok olarak hesaplanmıştır.

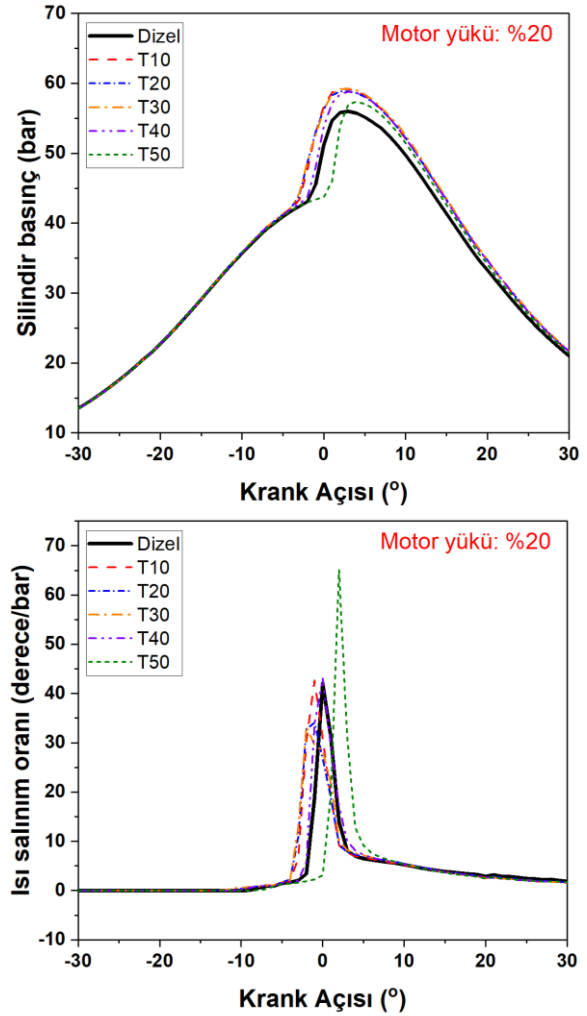
Araştırma Sonuçları ve Tartışma

Şekil 1 farklı oranlarda tolüenin dizele ilave edilmesinin motorun silindir içi basınç ve ısı salınım oranı üzerindeki etkisinin değişimini ifade eden eğriyi göstermektedir. Şekil 1’e göre, tolüen oranının %40’a kadar artırılmasının HRR’de çok büyük bir değişime sebep olmadığı, ancak basınçta artış sağladığı görülmüştür. Özellikle basınç eğrisi

incelendiğinde, dizele eklenen tolüen oranı %30 seviyesine kadar artırıldıkça, basınç ÜÖN'den önce artmaya başlamıştır. Oluşan bu artışın aynı zamanda maksimum basınç artışında da etkili olduğu görülmüştür. Benzer değişim ısı salınım oranı eğrilerinde de görülmüştür. Isı salınım oranı eğrisi incelendiğinde, maksimum HRR değerinin T50 yakıtlı deneyde olduğu gözlenmiştir. Karışım oranının %10'dan %30'a artması ile başlangıçta daha iyi bir yanma sağlanmış [13] ve yanmanın erken başlamasından dolayı basınç ve HRR değeri erken krank açılarındaki artmaya başlamıştır. T40 ve T50 yakıtlı testlerde ise basınç ve HRR değeri daha geç açılarda artmaya başlamış ve bu testlerde oluşan maksimum değerlerin olduğu krank açısı ÜÖN'den sonra ötelenmiştir. Basınçta en yüksek değerin T10 ve T20 yakıtlı testlerde olduğu görülürken, en düşük değerin T50 testinde elde edildiği tespit edilmiştir. Veriler analiz edildiğinde, dizele eklenen tolüenin düşük parlama noktası ve viskozite değerinin basınç değerinin değişiminde etkili olmasından kaynaklandığı değerlendirilmektedir. T10, T20 ve T30 yakıtlı testlerde, düşük viskozite ve parlama noktası değerlerinin oldukça etkili olduğu görülmüştür. Parlama noktası, yakıtın bir ateşleme kaynağına maruz kaldığında tutuşacağı en düşük sıcaklık olarak tanımlanmaktadır [14]. Ayrıca, yakıt atomizasyonunun yanmayı etkilediği bilinmektedir [15]. Bu iki veri göz önüne alındığında, yapılan çalışmada düşük viskoziteye sahip tolüenin, daha iyi bir atomizasyon sağlamanın yanında düşük parlama noktasının yanmayı daha erken krank açılarındaki başlamasına sebep olduğu düşünülmektedir. Dolgu içindeki tolüen miktarı arttıkça, yani T40 ve T50 yakıtlı testlerde, basınç değerindeki düşüşün, tolüenin düşük setan ve yüksek oktan sayısından dolayı yanmayı geciktirmesinden kaynaklandığı değerlendirilmiştir. Bu yakıtlar için basınçta görülen azalmaya rağmen, en yüksek HRR değerinin T50 yakıtlı testte oluşmasının da yine geç ve aniden başlayan yanmaya bağlı olduğu ve yanmanın kararsızlaşmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.



Şekil 2. Silindir içi maksimum sıcaklığın tolüen ilavesi ile değişimi

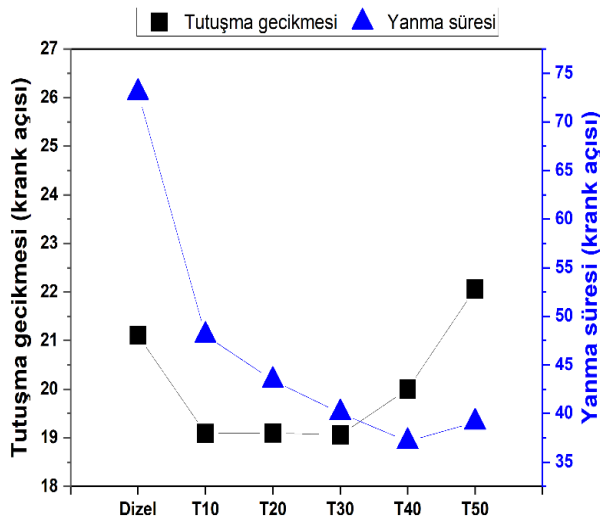


Şekil 1. Silindir içi basınç ve ısı salınım oranının tolüen ilavesi ile değişimi

Şekil 2 farklı oranlarda tolüenin dizele ilave edilmesinin motorun maksimum sıcaklık değeri üzerindeki etkisinin değişimini ifade eden eğriyi göstermektedir. Grafikteki bulgular, silindir içi maksimum sıcaklığın dizele eklenen tolüen ile birlikte ilk olarak kademeli olarak erken krank açılarındaki artmaya başladığını gösterirken, T40 ile birlikte kademeli olarak daha geç krank açılarındaki artış olduğunu ve T50 kullanımında iyice geç başladığını göstermektedir. Yapılan çalışmada, sıcaklık değişimini iki bölümde değerlendirmenin analizler açısından daha etkili olacağı düşünülmektedir. İlk bölümde tolüenin yakıt olarak T10-T30 aralığında kullanımı sonucundaki değişimi incelenmiştir. Bu bölümde özellikle tolüenin dizele eklenmesi ile dolgunun daha düşük viskozite değeri ile silindir içinde daha homojen bir karışım elde edilmiş ve bu sebeple yanmanın iyileşmesi ile sıcaklık değerinde artış meydana gelmiştir. İkinci bölümde ise T40 ve T50 yakıtlarının kullanımı söz konusudur. Bu yakıtlar daha düşük viskoziteye sahip olmalarına rağmen, yüksek oktan ve düşük setan sayısına da sahip olmalarından kaynaklanan daha geç yanma reaksiyonlarına sebep olmuştur. Bu sebeple pistonun hareketinin ÜÖN'den sonra başlayan yanma diğer yakıtların kullanıldığı testlere göre daha az etkili olmuş ve özellikle T50 yakıtı kullanımında sıcaklık değeri daha geç krank açılarındaki artmaya başlamıştır.

Özetle, sıcaklık değerinin kullanılan tolüenli tüm yakıtlar için artış gösterdiği ve en fazla artışın T20-T30 yakıtlı deneylerde olduğu belirlenmiştir. T40 ve T50 yakıtlı testte sıcaklık değeri daha geç krank açılarında artmaya başlamış ve maksimum sıcaklık değeri dizele göre yine de yüksek olmuştur.

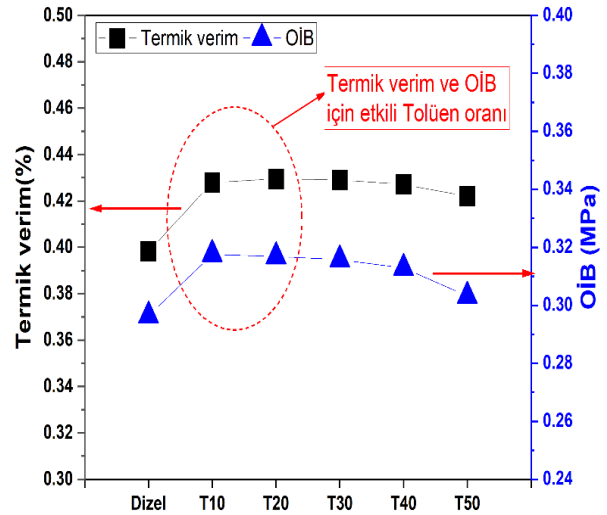
Şekil 3 tutuşma gecikmesi (TG) ve yanma süresinin (YS) dizele ilave edilen tolüen oranına bağlı olarak değişimini gösteren verilerin eğrisini göstermektedir. Veriler T10, T20 ve T30 yakıtlı testlerde tutuşma gecikmesinin neredeyse değişmediğini gösterirken, tolüen oranının artmasıyla T40-T50 yakıtlı testlerde tutuşma gecikmesinin oldukça hızlı bir şekilde uzadığını göstermiştir. Sıkıştırma ateşlemeli motorlarda tutuşma gecikmesinin süresi, daha sonraki motor performansını, yanma süreçlerini ve egzoz kirleticilerini etkileyen çok önemli bir performans parametresi olarak tarif edilmektedir. Ayrıca, tutuşma gecikmesinin yakıtın setan sayısının azalmasıyla doğrusal olmayan bir şekilde arttığı bilinmektedir [15]. Bu bilgiler ışığında, yapılan çalışmada tutuşma gecikmesinin tolüen oranını artışı ile birlikte arttığı, özellikle %40 olarak uygulanmaya başlamasından itibaren artış hızının da arttığı görülmektedir. Bu değişimin literatürde de bildirildiği gibi tolüenin düşük setan ve yüksek oktan sayısından kaynaklandığı düşünülmektedir. Şekil 3'te yanma süresinin değişimi de verilmiştir. Yanma süresinin tolüen oranı arttıkça kademeli olarak azaldığı, T50 yakıtlı testlerde kısmen artmasına rağmen dizele göre yine de azaldığı görülmüştür. Yanma süresinin, T10 ile birlikte azalmasının iki sebepten kaynaklandığı belirlenmiştir. İlk olarak artan tolüen oranı ile birlikte T10-T40 yakıtlı testlerde yakıt atomizasyonunun daha iyi olduğu ve yanmayı hızlandırdığı düşünülmektedir. T50 yakıtlı testlerde ise tutuşma gecikmesinin uzamasından dolayı hızlıca başlayan yanma sürecinin kısmen artmasına rağmen yine de oldukça az olduğu görülmüştür.



Şekil 3. Tutuşma gecikmesi ve yanma süresinin tolüen ilavesi ile değişimi

Şekil 4 termik verim ve ortalama indike basınç değerinin (OİB) dizele ilave edilen tolüen oranına bağlı olarak

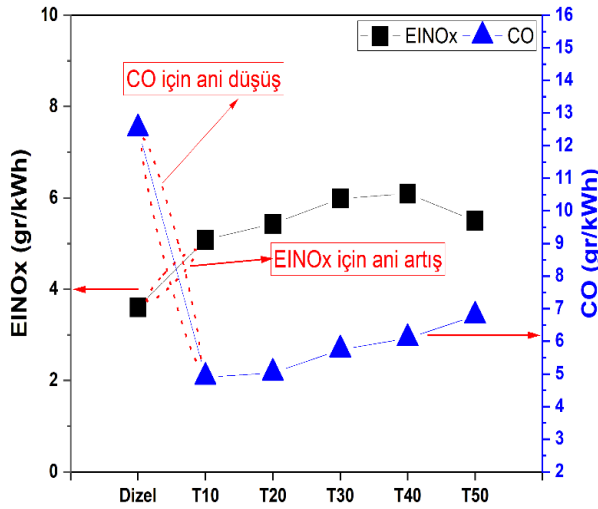
değişimini gösteren verilerin eğrisini göstermektedir. Bulgulara göre, termik verimin tüm yakıt karışımlarının kullanımında dizele kıyasla arttığı gözlenmiştir. Termik verimin artmasında en etkili olan yakıtların sırasıyla T10, T20 ve T30 olduğu görülmektedir. T40 ve T50 yakıtlarının kullanımında termik verimde kısmen azalma olsa da dizele göre artışın devam ettiği belirlenmiştir. Benzer değişim OİB eğrisinde de görülmektedir. Termik verim ve OİB değerlerinin belirlenmesinde daha öncede ifade edildiği gibi denklem 1 ve 2 kullanılmaktadır [11]. Bu denklemlere göre, net işin artması hem termik verim hem de OİB'nin artmasına katkıda bulunmaktadır. Bu bağlamda, T10, T20 ve T30 yakıtlı testlerde daha önceki şekillerde de belirtildiği gibi, dolgunun daha homojen olması sebebiyle hem sıcaklık hem de silindir içi basınç değerleri erken krank açılarında artmaya başlamış, yani tutuşma gecikmesi kısalmıştır. Bu durum yanma reaksiyonlarının pistonun ÜÖN'ye varmadan başlamasını sağlayarak pozitif işin artmasını sağlamıştır. Bunun sonucunda da hem verim hem de OİB verilerinde artış meydana gelmiştir. T40 ve T50 yakıtlı testlerde ise tutuşma gecikmesi uzamış, piston tekrar ÜÖN'den uzaklaşmaya başlamış ve bu durum net işte kısmen azalmaya sebep olmuş olsa da, elde edilen değer dizele kıyasla yine de yüksek kalmıştır. Özet olarak, yapılan çalışmada dizele eklene tolüen oranının %30 oranına kadar artırılmasının hem termik verim hem de OİB'yi etkili biçimde artırdığı görülmüştür. Tolüen oranının artırılarak %40 ve %50 oranında kullanılmasının kısmen verim ve OİB'de azalmaya sebep olmasına rağmen dizele kıyasla artış trendini koruduğu görülmüştür. Tüm bunlar göz önüne alındığında tolüenin dizele %10-30 oranlarında eklenmesinin termik verim ve OİB'yi artırmasının önemli ve umut verici olduğu değerlendirilmiştir.



Şekil 4. Termik verim ve OİB'nin tolüen ilavesi ile değişimi

Şekil 5'te EINOx ve CO emisyonlarının dizele ilave edilen tolüen oranına bağlı olarak değişimini gösteren verilere ait değişim eğrisi görülmektedir. EINOx ifadesi kullanılan sayısal program alt yapısında NOx türlerinin emisyon indeksi olarak tanımlanmaktadır. Grafikler incelendiğinde, NOx emisyonu eklenen tolüen ile tüm testlerde tüm yakıtlar için artmıştır. T10-T40 aralığındaki yakıtların kullanımında

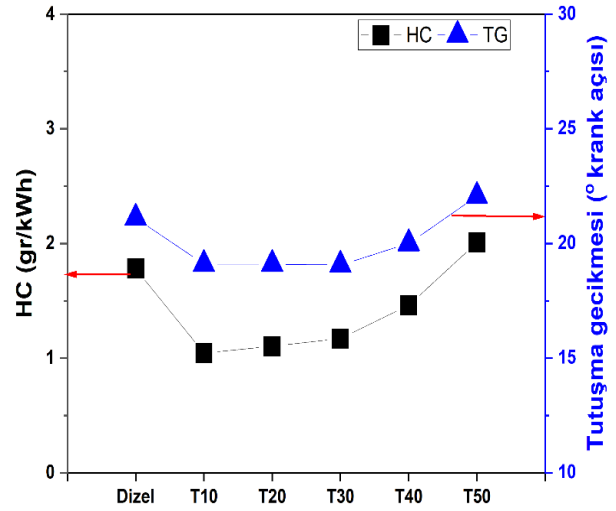
NOx emisyonunda artış meydana gelmiştir. T50 kullanımında T10-T40 yakıtlarına göre azalma meydana gelmesine rağmen bu artış dizel göre hala yüksek seviyededir. Bilindiği gibi NOx emisyonları yanma sıcaklığı ile oldukça bağlantılıdır [16]. Yapılan çalışmada da NOx değişiminin yanma sıcaklığına doğrudan bağlı olduğu görülmüştür. Daha öncede bahsedildiği gibi T10-T30 aralığındaki yakıtların yanmayı iyileştirdiği görülmüştü. Bu durum doğrudan NOx emisyonunda da artış sağlamıştır. Artan verimin yanma sıcaklığındaki etkisinin NOx emisyonunda artışa sebep olduğu değerlendirilmiştir. Tolüen ilavesi ile CO emisyonundaki değişim ise NOx emisyonunun tersine oldukça önemli oranda azalma ile sonuçlanmıştır. Tolüen ilave edilen tüm yakıtların CO emisyonunda dizel göre azalma meydana getirdiği gözlenmiştir. CO emisyonu eksik yanma, kötü atomizasyon ve yanma sıcaklığına doğrudan bağlı olarak oluşmaktadır [17], [18]. Yapılan çalışmada CO emisyonu tolüen ilavesi ile azalan dolgu viskozitesi ile daha iyi bir atomizasyon sağlanmasından dolayı azalmıştır. Tüm veriler değerlendirildiğinde, T10 ve T20 yakıtlarının NOx emisyonunda kısmen artış sağlamasına rağmen, CO emisyonunu azaltmada oldukça başarılı olduğu görülmektedir. Bu sonucun dizel motorlardan düşük yüklerde kaynaklanan kötü yanma koşullarını iyileştirerek CO emisyon kontrolü açısından umut verici olduğu değerlendirilmiştir.



Şekil 5. EINOx ve CO emisyonunun dizel tolüen ilavesi ile değişimi

Şekil 6 HC emisyonunun dizel ilave edilen tolüen oranına ve tutuşma gecikmesine bağlı olarak değişimini gösteren verilere ait değişim eğrisini göstermektedir. Bulgular incelendiğinde, HC emisyonunun T10-T40 yakıtlarının kullanımında azaldığı, T50 kullanımında ise arttığı görülmüştür. HC emisyonunda oluşan değişim tutuşma gecikmesindeki değişimden oldukça etkilendiği görülmüştür. Tutuşma gecikmesinin tolüen ilavesi ile T10-T30 yakıtlarının kullanımında azalmasının daha iyi bir atomizasyon sonucu olduğu ve yanmayı iyileştirdiği daha önce ifade edilmiştir. Bu durum HC emisyonunda da aynı olmuştur. İyileşen yanma ve atomizasyondan dolayı HC emisyonunun azaldığı görülmektedir. T50 kullanımında ise

azalan viskoziteye rağmen, geciken yanmadan dolayı yanma reaksiyonu için zaman yetersiz olmuş ve HC emisyonlarında artış meydana gelmiştir. Literatürde de HC emisyonunun tutuşma gecikmesi ve yanmanın iyileşmesine göre değişim gösterdiği belirtilmektedir [19], [20], [21]. Yapılan çalışmada da bu sonuçların benzer değişime uğradığı görülmüştür. Özetle, tolüen %30 oranına kadar kullanımının tutuşma gecikmesindeki kısılmayla birlikte yanmayı iyileştirdiği ve HC emisyonunu azalttığı görülmektedir. Bu durum HC emisyonunun kontrolü adına önemli olduğu değerlendirilmektedir.



Şekil 6. HC emisyonunun tutuşma gecikmesi ve tolüen ilavesi ile değişimi

Sonuçlar

Yapılan çalışmada dizel motorlarda performansı azalmadan ve herhangi bir tasarım değişimi olmadan emisyonların azaltılması için tolüen dizel yakıtına eklenmiştir. Elde edilen analiz sonuçları yukarıda detaylı olarak sunulmuştur. Aşağıda çalışmanın önemli yönleri belirtilmiştir.

- Sayısal testlerde dizel yerine kullanılan yakıtlar, düşük setan sayısı nedeniyle yanma reaksiyonlarını iyileştirdi. Bu durum basınç ve HRR grafiğinden görülebilmektedir. Özellikle T10, T20, T30 ve T40 yakıtları basınç ve sıcaklıkta artışa sebep oldu.
- T10-T30 aralığındaki yakıtlar tutuşma gecikmesini dizel göre oldukça kısaltırken, T40-T50 aralığındaki yakıtlar tutuşma gecikmesini artırmıştır. Buna karşın tolüenli tüm yakıtlar yanma süresini dizel göre kısaltmıştır.
- Tolüen eklenen tüm yakıtlar OİB ve termik verimde kayda değer bir azalmaya sebep olmadı. Ayrıca, T10-T40 aralığındaki yakıtlar hem OİB hem de termik verim değerini artırmıştır. Bu sonuç motor performansı adına oldukça önemlidir.
- Dizel eklenen tolüen %10-%40 aralığında kullanımı ile CO ve HC emisyonunun kontrolünü sağlamada başarı sağladı. Özellikle T10 kullanımında CO

ve HC emisyonunda %61 ve %41 gibi önemli oranda azalmalar gözlemlendi.

Tüm veriler değerlendirildiğinde, dizele tolüen ilave edilmesinin motor performansı ve emisyonunda önemli sonuçları olduğu görüldü. Özellikle T10-T30 yakıtlarının daha detaylı araştırılmasının dizel motorları inceleyen çalışmalara katkı vermesi beklenmektedir.

Etik kurul onayı ve çıkar çatışması beyanı

Hazırlanan makalede etik kurul izni alınmasına gerek yoktur. Hazırlanan makalede herhangi bir kişi/kurum ile çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Yazar Katkıları

Makalede yapılan tüm işlemler yazara aittir.

-Çalışma konsepti ve tasarım (M.O.-M.F.)

-Veri toplama (M.O.-M.F.)

-Verilerin analizi ve yorumlanması (M.O.-M.F.)

-Taslağın oluşturulması (M.O.-M.F.)

-Revizyon (M.O.-M.F.)

Teşekkür

-

Kaynaklar

- [1] M. El-Adawy, 'Effects of diesel-biodiesel fuel blends doped with zinc oxide nanoparticles on performance and combustion attributes of a diesel engine', *Alex. Eng. J.*, vol. 80, pp. 269–281, 2023.
- [2] A. Kumar, S. Lahane, C. B. Kumar, I. Mohan, and D. B. Lata, 'Effect of tri-ethylene glycol mono methyl ether and alumina additives on ignition delay in a hydrogen fuelled dual-fuel diesel engine', *Int. J. Hydrog. Energy*, vol. 49, pp. 1123–1132, 2024.
- [3] H. Gürbüz, S. Demirtürk, İ. H. Akçay, and H. Akçay, 'Effect of port injection of ethanol on engine performance, exhaust emissions and environmental factors in a dual-fuel diesel engine', *Energy Environ.*, vol. 32, no. 5, pp. 784–802, Aug. 2021, doi: 10.1177/0958305X20960701.
- [4] F. Akram *et al.*, 'Current trends in biodiesel production technologies and future progressions: A possible displacement of the petro-diesel', *J. Clean. Prod.*, vol. 370, p. 133479, Oct. 2022, doi: 10.1016/j.jclepro.2022.133479.
- [5] A. F. Emma, S. Alangar, and A. K. Yadav, 'Extraction and characterization of coffee husk biodiesel and investigation of its effect on performance, combustion, and emission characteristics in a diesel engine', *Energy Convers. Manag.*, vol. 14, p. 100214, May 2022, doi: 10.1016/j.ecmx.2022.100214.
- [6] M. Qenawy *et al.*, 'Performance and emission of extracted biodiesel from mixed Jatropha-Castor seeds', *Fuel*, vol. 357, p. 130060, Feb. 2024, doi: 10.1016/j.fuel.2023.130060.
- [7] M. Okcu, Y. Varol, Ş. Altun, and M. Firat, 'Effects of isopropanol-butanol-ethanol (IBE) on combustion characteristics of a RCCI engine fueled by biodiesel fuel', *Sustain. Energy Technol. Assess.*, vol. 47, p. 101443, Oct. 2021, doi: 10.1016/j.seta.2021.101443.
- [8] M. G. Krishnan, S. Rajkumar, J. Thangaraja, and Y. Devarajan, 'Exploring the synergistic potential of higher alcohols and biodiesel in blended and dual fuel combustion modes in diesel engines: A comprehensive review', *Sustain. Chem. Pharm.*, vol. 35, p. 101180, Oct. 2023, doi: 10.1016/j.scp.2023.101180.
- [9] G. Pullagura *et al.*, 'Enhancing performance characteristics of biodiesel-alcohol/diesel blends with hydrogen and graphene nanoplatelets in a diesel engine', *Int. J. Hydrog. Energy*, vol. 50, pp. 1020–1034, Jan. 2024, doi: 10.1016/j.ijhydene.2023.09.313.
- [10] C. Lee, Y. Wu, H. Wu, Z. Shi, L. Zhang, and F. Liu, 'The experimental investigation on the impact of toluene addition on low-temperature ignition characteristics of diesel spray', *Fuel*, vol. 254, p. 115580, Oct. 2019, doi: 10.1016/j.fuel.2019.05.163.
- [11] A. Forte, '17.0', *ANSYS San Diego*, 2015.
- [12] S. Özer, M. Akçay, and E. Vural, 'Effect of toluene addition to waste cooking oil on combustion characteristics of a CI engine', *Fuel*, vol. 303, p. 121284, 2021.
- [13] P. Kwanchareon, A. Luengnaruemitchai, and S. Jai-In, 'Solubility of a diesel-biodiesel-ethanol blend, its fuel properties, and its emission characteristics from diesel engine', *Fuel*, vol. 86, no. 7, pp. 1053–1061, May 2007, doi: 10.1016/j.fuel.2006.09.034.
- [14] V. D. Chaudhari, A. Kulkarni, and D. Deshmukh, 'Spray characteristics of biofuels for advance combustion engines', *Clean. Eng. Technol.*, vol. 5, p. 100265, Dec. 2021, doi: 10.1016/j.clet.2021.100265.
- [15] H. Köten and A. S. Parlakyiğit, 'Effects of the diesel engine parameters on the ignition delay', *Fuel*, vol. 216, pp. 23–28, Mar. 2018, doi: 10.1016/j.fuel.2017.11.136.
- [16] S. Manigandan, J. I. Ryu, T. R. Praveen Kumar, and M. Elgendi, 'Hydrogen and ammonia as a primary fuel – A critical review of production technologies, diesel engine applications, and challenges', *Fuel*, vol. 352, p. 129100, Nov. 2023, doi: 10.1016/j.fuel.2023.129100.
- [17] R. N. Bhagat, K. B. Sahu, S. K. Ghadai, and C. B. Kumar, 'A review of performance and emissions of diesel engine operating on dual fuel mode with hydrogen as gaseous fuel', *Int. J. Hydrog. Energy*, vol. 48, no. 70, pp. 27394–27407, Aug. 2023, doi: 10.1016/j.ijhydene.2023.03.251.
- [18] S. H. Hosseini *et al.*, 'Use of hydrogen in dual-fuel diesel engines', *Prog. Energy Combust. Sci.*, vol. 98, p. 101100, Sep. 2023, doi: 10.1016/j.pecs.2023.101100.
- [19] A. Tamilvanan *et al.*, 'Effect of diethyl ether and ethanol as an oxygenated additive on Calophyllum inophyllum biodiesel in CI engine', *Environ. Sci.*

- Pollut. Res.*, vol. 28, no. 26, pp. 33880–33898, Jul. 2021, doi: 10.1007/s11356-020-10624-3.
- [20] A. K. Agarwal *et al.*, ‘Effect of fuel injection pressure and injection timing of Karanja biodiesel blends on fuel spray, engine performance, emissions and combustion characteristics’, *Energy Convers. Manag.*, vol. 91, pp. 302–314, Feb. 2015, doi: 10.1016/j.enconman.2014.12.004.
- [21] H. K. Suh, S. H. Yoon, and C. S. Lee, ‘Effect of Multiple Injection Strategies on the Spray Atomization and Reduction of Exhaust Emissions in a Compression Ignition Engine Fueled with Dimethyl Ether (DME)’, *Energy Fuels*, vol. 24, no. 2, pp. 1323–1332, Feb. 2010, doi: 10.1021/ef9010143.