

## PAPER DETAILS

TITLE: Bor oksit nanoparçacıklarının dizel yakıt katkisi olarak kullanılabilirliğinin araştırılması

AUTHORS: Abdülvahap ÇAKMAK,Hakan ÖZCAN

PAGES: 420-429

ORIGINAL PDF URL: <https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/2073961>



# BOR DERGİSİ

## JOURNAL OF BORON

<https://dergipark.org.tr/boron>



## Bor oksit nanoparçacıklarının dizel yakıt katkısı olarak kullanılabilirliğinin araştırılması

Abdülvahap Çakmak<sup>1,\*</sup>, Hakan Özcan<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Samsun Üniversitesi, Kavak Meslek Yüksekokulu, Motorlu Araçlar ve Ulaştırma Teknolojileri Bölümü, Samsun, 55850, Türkiye

<sup>2</sup>Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Samsun, 55270, Türkiye

### MAKALE BİLGİSİ

#### Makale Geçmişi:

İlk gönderi 10 Kasım 2021

Kabul 20 Şubat 2022

Online 29 Mart 2022

#### Araştırma Makalesi

DOI: 10.30728/boron.1021667

#### Anahtar kelimeler:

Bor oksit  
Dizel motor  
Emisyon  
Nanoyakıt katkısı  
Performans

### ÖZET

Bu çalışmada bor oksit ( $B_2O_3$ ) nanoparçacıklarının dizel yakıt katkısı olarak kullanılabilirliği deneysel olarak araştırılmıştır. Bor oksit nano parçacıkları, hacimsel %20 oranında kanola yağı biyodizeli içeren dizel-biyodizel karışımına (B20) 50 ppm, 100 ppm ve 200 ppm konsantrasyonunda mekanik ve ultrasonik karıştırma yöntemleri ile eklenmiştir. Hazırlanan nanoyakıtların bazı yakıt özellikleri ölçülmüş ve ardından standart motor ayarlarında motor testleri gerçekleştirilmiştir. Bu testlerde bor oksit nanoparçacıklarının dizel motorunun yanma, performans ve emisyon karakteristiklerine etkisi araştırılmıştır. Ayrıca yakıt fiyatı ve özgül yakıt tüketimine dayalı olarak bir maliyet analizi gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, bor oksit nanoparçacıkları yakıtın soğukta akış özelliklerini geliştirdiği ancak kinematik viskozitesini artırdığı gözlemlenmiştir. Motor performansı açısından bor oksit nanoparçacıklarının 100 ppm oranında kullanılabileceği belirlenmiştir. Bu nanoparçacık konsantrasyonunda motorun özgül yakıt tüketiminin %1,66 oranında azaldığı ve efektif veriminin %0,96 oranında arttığı belirlenmiştir. Aynı zamanda CO ve HC emisyonları ortalama olarak sırası ile %1,29 ve %22,12 oranında azalmıştır. Fakat motorun aynı çalışma şartlarında NO ve is emisyonları ortalama olarak %14,90 ve %31,03 oranında artmıştır. Bununla birlikte özgül yakıt tüketimi düşmesine rağmen nanoparçacıklarının yüksek fiyatı nedeniyle birim efektif güç için yakıt maliyeti ortalama %116 oranında artmıştır. Tüm bulgular değerlendirildiğinde, fayda-maliyet dengesinin sağlanması halinde bor oksit nanoparçacıklarının dizel-biyodizel yakıt karışımları için nanoyakıt katkısı olarak kullanılabileceği belirlenmiştir.

## Investigation of the usability of boron oxide nanoparticles as diesel fuel additive

### ARTICLE INFO

#### Article History:

Received November 10, 2021

Accepted February 20, 2022

Available online March 29, 2022

#### Research Article

DOI: 10.30728/boron.1021667

#### Keywords:

Boron oxide  
Diesel engine  
Emission  
Nanofuel additive  
Performance

### ABSTRACT

In this study, the usability of the boron oxide ( $B_2O_3$ ) nanoparticles as diesel fuel additive was experimentally investigated. Boron oxide nanoparticles were added to the diesel-biodiesel blend (B20) containing 20% by volume canola oil biodiesel at 50 ppm, 100 ppm, and 200 ppm concentrations by mechanical and ultrasonic mixing techniques. Some fuel properties of the prepared nano fuels were measured and then engine tests were carried out at standard engine settings. In these tests, the effect of boron oxide nanoparticles on combustion, performance, and emissions characteristics of the diesel engine were investigated. In addition, a cost analysis was carried out depending on fuel price and specific fuel consumption. According to the results obtained, it was determined that boron oxide nanoparticles improve the cold flow properties of the fuel but increase the kinematic viscosity. It has been determined that boron oxide nanoparticles can be used at a concentration of 100 ppm in terms of high engine performance. It was ascertained that the specific fuel consumption of the engine decreased by 1.66% and the effective efficiency increased by 0.96% at this nanoparticle concentration. At the same time, CO and HC emissions decreased on average by 1.29% and 22.12%, respectively. But under the same engine operating conditions, NO and soot emissions increased by 14.90% and 31.03% on average. Though, the decrease in specific fuel consumption, the fuel cost per unit of effective power increased by 116% on average due to the high price of nanoparticles. Once all findings are evaluated, it has been concluded that boron oxide nanoparticles can be used as nanofuel additives for diesel-biodiesel fuel mixtures if the benefit-cost balance is achieved.

\*Corresponding author: [abdulvahap.cakmak@samsun.edu.tr](mailto:abdulvahap.cakmak@samsun.edu.tr)

## 1. Giriş (Introduction)

Mevcut dizel motor teknolojisi ve emisyon kontrol sistemleri ile egzoz emisyonları büyük oranda azaltılmasına rağmen bu önlemlerin yeni emisyon standartlarının karşılanmasında yetersiz kalacağı ve bu nedenle ek kontrol yöntemlerinin kullanılmasının kaçınılmaz olduğu bilinmektedir [1]. Yakıt katkılarının kullanılması diğer emisyon kontrol yöntemlerine göre daha basit ve etkili bir yöntem olduğu için [2], yeni emisyon kontrol yöntemi olarak nano yakıt katkılarının kullanımı araştırmacıların ilgisini çekmiş ve son yıllarda nano yakıt katkıları konusunda yapılan araştırmalar hızla artmıştır. Yapılan çalışmalarda nano yakıt katkılarının aynı zamanda yakıt özelliklerini geliştirdiği ve motor performansını artırdığı da belirlenmiştir [3].

Nanoparçacıklar değişik geometrik şekillere sahip 1-100 nm boyutlarında olan parçacıklardır. Nanoparçacıklar, diğer malzemelere göre çok farklı ve üstün özelliklere sahip oldukları için otomotiv, kozmetik, ilaç, biyomedikal, petrokimya, elektronik ve yakma sistemleri gibi çok geniş uygulama alanında kullanılmaktadır. Nanoparçacıkların üstün özelliklerinin nedenleri; çok büyük yüzey alanı/hacim oranı, gelişmiş mekanik dayanım, yüzey atomlarının farklı karakteristikleri, kuantum boyut etkileri ve parçacığın elektronik yapısının boyut bağımlılığı olduğu belirtilmektedir [4,5].

Nanoyakıt, nanoparçacıkların sıvı yakıt içindeki süspansiyonudur. Süspansiyon kalitesini artırmak için ultrasonik karıştırma tekniği ve sürfaktan maddeler kullanılabilir. Yakıt içindeki nanoparçacıklar genel olarak yakıtların termo-fiziksel özelliklerini geliştirir, motor performansını artırır ve kirlenici egzoz emisyonlarını azaltır [6]. Bu etkilerin oluşturulması için nanoparçacıkların çok düşük miktarlarda yakıtı eklenmesi (örneğin 1 kg yakıt için 10-1000 mg nanoparçacık) yeterlidir [7]. Yakıt katkısı olarak kullanılan nanoparçacıkların oluşturduğu bu etkilerin nedenleri şunlardır:

- Nanoparçacıklar yakıtın ısı iletim kapasitesini artırır. Buna bağlı olarak yakıt damlacıklarının buharlaşma hızı artar ve fiziksel tutuşma gecikmesi kısalmış olur [8].
- Nanoparçacık bileşimindeki oksijen yanma için ekstradan oksijen sağlar ve HC, CO ve is emisyonlarını azaltabilir [9].
- Nanoparçacıklar çok yüksek yüzey alanı/hacim oranına sahiptir. Bu özellik yanma odasında hava ve yakıt molekülleri için daha geniş temas alanı sağlayarak karışımın homojenliğini artırır [10]. Homojen karışımın yanması durumunda yanma verimi artar ve kirlenici egzoz emisyonları azalır.
- Nanoparçacıklar yüksek kimyasal aktiviteleri nedeniyle yanma sırasında katalitik etki oluşturarak yanmayı hızlandırır. Kimyasal reaksiyonların aktivasyon enerjisini düşürerek yanmanın daha düşük sıcaklıkta gerçekleşmesini sağlar [11].
- Nanoparçacıklar püskürtme esnasında yakıt damlacığının momentumunu artırarak yakıt jetinin nüfuz derinliğini artırır ve silindir içerisinde daha homojen bir hava-yakıt karışım elde edilir [12].

Nano boyutlardaki bor oksit parçacıklarının nanoyakıt katkısı olarak kullanılması halinde yukarıda belirtilen etkileri oluşturabilir. Literatürde, nano yakıt katkıları ile ilgili bilimsel çalışmalarda genellikle alüminyum oksit [13,14], seryum oksit [15], titanyum dioksit [16,17] gibi metal esaslı nanoparçacıklar ile grafit [18], grafit [19] ve karbon nanotüp [20] gibi karbon esaslı nanoparçacıkların kullanılabilirliği incelenmiştir. Ancak bor oksit nanoparçacıkları da yüksek yüzey alanı/hacim oranı ve yüksek termal iletkenlik [21] gibi termofiziksel özelliklere sahip olması nedeniyle nanoyakıt katkısı olarak kullanıma potansiyeli bulunmaktadır. Fakat mevcut literatür incelendiğinde, bor oksit nanoparçacıklarının dizel yakıt katkısı olarak kullanılabilirliğinin araştırılmadığı belirlenmiştir. Ojha ve Karmakar [22] bor esaslı nanoparçacıkların yüksek enerji içeriği nedeni ile sıvı yakıtlarla birlikte kullanılabilirliğini belirtmiş ancak bu konudaki çalışmaların yetersiz olduğunu vurgulamıştır.

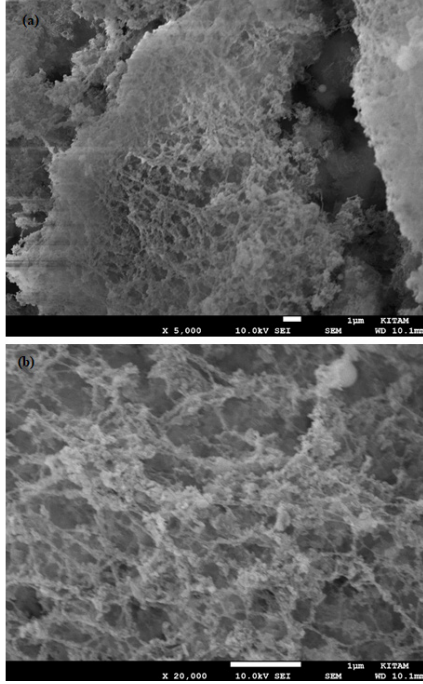
Türkiye en çok bor rezervlerine sahip olan ülkedir. Bor türevli bir madde olan bor oksit ( $B_2O_3$ : dibor trioksit) ise borun temel oksididir [23]. Bor oksit normal şartlarda amorf camsı haldedir ve iki farklı forma sahip kristal yapıda bulunur. Bor oksitin amorf formu renksiz, kokusuz, sert, camsı yapıya sahip bir katıdır ve genellikle borik asidin dehidrasyonu ile üretilir. Bor oksidin diğer kristal hali ise daha az rastlanılan monoklinik bor oksittir. Bu kristaller; sert, beyaz ve kokusuzdur [24]. Mikron boyutlardaki bor oksit parçacıkları yüksek enerjili bil-yeli değirmende nano boyutlara kolaylıkla öğütülebilmektedir [25] veya plazma tekniği ile yüksek saflıkta bor nano parçacıkları sentezlenebilmektedir [26]. Bor oksit nanoparçacıklarının yoğunluğu yaklaşık 2,46 g/cm<sup>3</sup>, erime noktası sıcaklığı 460°C, kaynama noktası sıcaklığı 2250°C, ısı iletim katsayısı 0,345 W/mK ve yüzey alanı 10-50 m<sup>2</sup>/g aralığındadır [22,24]. Bu özellikleri sayesinde bor oksit nanoparçacıkları yanma ve yakıt uygulamaları için potansiyel bir maddedir [27].

Bu çalışmanın amacı, bor oksit nanoparçacıklarının dizel yakıt katkısı olarak kullanılabilirliğini deneysel olarak araştırmaktır. Çalışma kapsamında bor oksit nanoparçacıkları 50 ppm, 100 ppm ve 200 ppm konsantrasyonda dizel-biyodizel yakıt karışımına eklenecek nano yakıtlar hazırlanmış ve bu yakıtların önemli termofiziksel özellikleri belirlenmiştir. Ardından bu yakıtlar motor testine tabi tutularak bor oksit nanoparçacıkların motorun yanma, performans ve egzoz emisyon karakteristiklerine etkisi araştırılmıştır. Ayrıca bor oksit nanoparçacıklarının kullanımı nedeniyle ortaya çıkan maliyet artışı da belirlenmiştir.

## 2. Malzemeler ve Yöntemler (Materials and Methods)

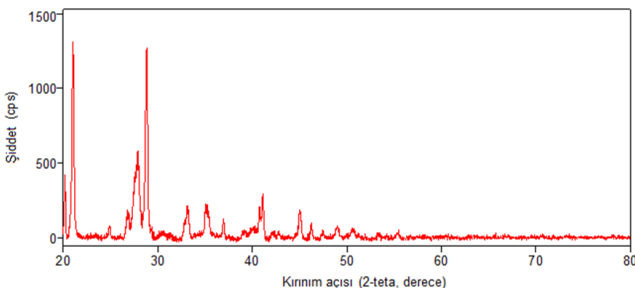
Çalışmada *Nanogarfi* firmasında temin edilen, %99,95 saflıkta ve 50 nm çapında olan bor oksit nano parçacıkları nano yakıt katkısı olarak kullanılmıştır. Temin edilen bor oksit nanoparçacıklarının karakterizasyonu, Ondokuz Mayıs Üniversitesi Karadeniz İleri Teknoloji Araştırma ve Uygulama Merkezi'nde (KİTAM) taramalı elektron mikroskobu (SEM: *Scanning electron microscopy*; Cihaz: JEOL JSM-7001F, Thermo Fisher Scien-

tific, ABD) ve X ışını kırınım (XRD: X-ray Diffraction; Cihaz: Rigaku SmartLab) yöntemleri ile yapılmıştır. Şekil 1'de bor oksit nanoparçacıklarının farklı büyütme oranında elde edilen SEM görüntüleri verilmiştir. Elde edilen SEM görüntüleri incelendiğinde homojen bir dağılım görülmektedir. Bor oksit nano yapısı gereği yapıda toplanmış olup küresel forma yakın morfolojidedir.



**Şekil 1.** Bor oksit nanoparçacıklarının (a) 5.000X ve (b) 20.000X büyütme oranında elde edilen SEM görüntüleri (SEM images of boron oxide nanoparticles obtained at (a) 5,000X and (b) 20,000X magnification).

Şekil 2'de ise bor oksit nanoparçacıklarının XRD grafiği sunulmuştur. Şekil 2'deki XRD desenlerinde 28,83 derecede görülen pik bor oksitin ana fazına aittir [28]. Elde edilen XRD deseni Liv vd. [29] ve Alizadeh vd. [25] elde ettiği sonuçlarla uyumludur. Bor oksit nanoparçacıkları herhangi bir ön işleme tabi tutulmadan doğrudan kullanılmıştır. Bor oksit nanoparçacıkları 50 ppm, 100 ppm ve 200 ppm konsantrasyonunda mekanik ve ultrasonik karıştırma işlemleriyle B20 (%20 kanola yağı biyodizeli + %80 dizel) yakıtına eklenerek bor oksit nanoparçacıkları içeren test yakıtları hazır-



**Şekil 2.** Bor oksit nanoparçacıklarının XRD spektrumu (XRD spectrum of the boron oxide nanoparticles).

lanmıştır. Bu yakıtlar sırası ile B20BO50, B20BO100 ve B20BO200 şeklinde etiketlenmiştir. Bor oksit nanoparçacıklarının etkilerini net olarak gözlemleyebilmek için nanoyakıtlar hazırlanırken süfaktan madde kullanılmamıştır. Nanoparçacık içermeyen B20 yakıtı referans yakıt olarak kullanılmıştır.



**Şekil 3.** Test yakıtlarına ait numunelerinin görüntüleri (Images of samples of test fuels).

Test yakıtlarına ait numunelerinin fotoğraflık görünüşü Şekil 3'te verilmiştir. Bor oksit nanoparçacıkları beyaz renkte olduğu için ve yakıtı eklenen bor oksit miktarı az olduğu için yakıt renginde gözle fark edilir bir değişim meydana gelmemiştir. Motor testlerinden önce nanoyakıtların bazı önemli yakıt özellikleri ilgili test metodları izlenerek belirlenmiştir.

Motor testleri Kirloskar marka TV1 model, dört zamanlı, su soğutmalı, direkt enjeksiyonu tek silindirli bir dizel motorunda gerçekleştirilmiştir. Motoru yüklemek için Edyy akımlı su soğutmalı bir dinamometre kullanılmıştır. Motor testleri motorun maksimum tork çıkışının %25, %50, %75 ve %100'üne karşılık gelen yük noktalarında ve 1500 d/dk sabit devir sayısında gerçekleştirilmiştir. Motor testleri standart motor ayarlarında (standart sıkıştırma oranı: 17,5/1 ve standart püskürtme avansı: 337 krank mili açısında (KMA)) yapılmıştır. Test sistemi ile ilgili ayrıntılı bilgilere, motor performans ve yanma karakteristiklerinin hesaplanması için kullanılan bağıntılara yazarların diğer çalışmalarında ulaşılabilir [30,31]. Deneyler sırasında motor yükü, devir sayısı, hava ve yakıt debisi, ortam sıcaklığı ve bağıl nemi, egzoz gaz sıcaklığı, motor soğutma sıvısı debisi ve motora giriş-çıkış sıcaklığı, krank mili açısı ve silindir basıncı gibi deneysel veriler ölçülmüş ve bilgisayara kaydedilmiştir. Daha sonra bu veriler işlenerek motorun yanma ve performans parametreleri hesaplanmıştır. HC, CO ve NO emisyonları BOSCH BEA 060 egzoz gaz analiz cihazı ile, is emisyonları (duman koyuluğu) ise BOSCH BEA 070 is ölçüm cihazı ile belirlenmiştir. Ölçümlere motor kararlı çalışma şartlarına ulaştıktan sonra başlanmıştır. Performans parametreleri için dört ölçüm, egzoz emisyonları için altı ölçüm verisi kaydedilmiş ve hesaplamalarda ortalama değerler dikkate alınmıştır. Yanma karakteristiklerinin belirlenmesinde silindir basıncı 1° KMA adımlarla 100 çevrim boyunca ölçülmüş ve hesaplamalarda ortalama basınç değerleri dikkate alınmıştır.

Deneysel çalışmalarda ölçülen fiziksel büyüklükler ölçüm cihazının hassasiyeti, tercih edilen ölçüm yöntemi, ortam koşulları vb. nedenlere bağlı olarak bir miktar hata (belirsizlik) içerir. Ölçülen fiziksel büyüklükler daha sonra performans parametrelerinin hesaplanmasında kullanıldığında, mevcut belirsizlikler hesaplanan parametrelerde yayılarak hatalara yol açar. Bu nedenle hesaplanan parametrelerin anlamlılığını ve doğruluğunu ortaya koymak için belirsizlik analizinin yapılması oldukça önemlidir. Bu çalışmada belirsizlik analizi Kline ve McClintock [32] tarafından önerilen yöntemle yapılmıştır. Deneysel çalışmada tespit edilen fiziksel büyüklük R ve bu büyüklüğe etki eden n adet bağımsız değişken  $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$  mevcuttur. Bu durumda  $R=R(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$  fonksiyonu yazılabilir. Her bir bağımsız değişkene ait boyutlu belirsizlik  $w_1, w_2, w_3, \dots, w_n$  olduğu için R büyüklüğünün boyutlu belirsizliği  $w_R$  aşağıdaki Eş.1 [33] ile hesaplanır. Yüzde cinsinden boyutsuz (oransal) belirsizlik ise Eş.2'den hesaplanır.

$$w_R = \pm \left[ \left( \frac{\partial R}{\partial x_1} \cdot w_1 \right)^2 + \left( \frac{\partial R}{\partial x_2} \cdot w_2 \right)^2 + \dots + \left( \frac{\partial R}{\partial x_n} \cdot w_n \right)^2 \right]^{1/2} \quad (1)$$

$$\tilde{w}_R (\%) = \pm \frac{w_R}{R} \times 100 \quad (2)$$

Tablo 1'de yukarda açıklanan yöntemle göre tam yükte motor performans parametreleri için hesaplanan maksimum belirsizlikler verilmiştir. Hesaplanan belirsizlik değerleri mühendislik uygulamaları için kabul edilebilir değerler (<5%) [34,35] olduğu görülmüştür.

**Tablo 1.** Tam yükte hesaplanan maksimum belirsizlikler (Maximum uncertainties calculated at full load).

| Performans Parametreleri | Boyutlu Belirsizlik   | Boyutsuz (Oransal) Belirsizlik |
|--------------------------|-----------------------|--------------------------------|
| Efektif motor gücü       | $\pm 0,015984$ kW     | $\pm 0,4662$                   |
| Yakıt debisi             | $\pm 0,005018$ kg/h   | $\pm 0,6678$                   |
| Hava debisi              | $\pm 0,213372$ kg/h   | $\pm 0,8355$                   |
| Özgöl yakıt tüketimi     | $\pm 0,001782$ kg/kWh | $\pm 0,8176$                   |
| Efektif (termik) verim   | $\pm 0,003142$        | $\pm 0,8223$                   |
| Hava/Yakıt oranı         | $\pm 0,359698$        | $\pm 1,0648$                   |

Literatürde nanoyakıtların maliyet analizine yönelik yapılan çalışmalarda [36,37] sadece nanoparçacık ilavesi nedeni ile yakıtın litre fiyatında meydana gelen artışlar belirlenmiştir. Fakat nanoparçacıklar yakıtın litre fiyatını arttırmasına rağmen motorun özgül yakıt tüketimini düşürürler. Bu nedenle daha gerçekçi bir maliyet analizi için sadece yakıt fiyatındaki artış değil aynı zamanda özgül yakıt tüketimindeki düşüşün de dikkate alınması gerekir. Bu çalışmada yakıt fiyatı ve özgül yakıt tüketiminin dikkate alındığı maliyet analizi için Durgun [38] tarafından geliştirilen ve literatürde bazı araştırmacılar [34,39,40] tarafından tercih edilen Eş. 3 kullanılmıştır. Bu çalışmada Eş. 3 bağıntısı, bor oksit içeren nanoyakıtların, bor oksit içermeyen referans yakıtla kıyasla, birim efektif motor gücü için yakıt maliyetinde meydana gelen yüzde değişimi vermektedir. Burada  $M_{NY}$  ve  $M_R$  sırası ile nanoyakıtın ve referans

yakıtın maliyetini,  $be_{NY}$  ve  $be_R$  sırası ile nanoyakıtın ve referans yakıtın kullanımında hesaplanan özgül yakıt tüketimini ( $kg/kW-h$ ),  $F_{NY}$  ve  $F_R$  sırası ile nanoyakıtın ve referans yakıtın fiyatını (TL/L),  $\rho_{NY}$  ve  $\rho_R$  sırası ile nanoyakıtın ve referans yakıtın yoğunluğunu ( $kg/L$ ) belirtmektedir.

$$\frac{\Delta M}{M_R} \times 100 = \frac{M_{NY} - M_R}{M_R} \times 100 = \left[ \frac{be_{NY} \times F_{NY}/\rho_{NY}}{be_R \times F_R/\rho_R} - 1 \right] \times 100 \quad (3)$$

### 3. Sonuçlar ve Tartışma (Results and Discussion)

#### 3.1. Yakıt Özellikleri (Fuel Properties)

Tablo 2'de görüldüğü üzere bor oksit nanoparçacıklarının yakıtların yoğunluk ve kükürt içeriğine önemli bir etkisinin olmadığı belirlenmiştir. B20 yakıtına 50 ppm oranında bor oksit nanoparçacıklarının eklenmesi durumunda yakıtın parlama noktası sıcaklığı 2°C artmıştır. Nanoparçacık oranının daha fazla artırılması parlama noktası sıcaklığını değiştirmemiştir. Bor oksit nanoparçacıklarının, belirlenen yakıt özelliklerine en belirgin etkisi kinematik viskozite ve soğukta filtre tıkanma noktası sıcaklığında görülmüştür. Bor oksit nanoparçacıkları yakıtın kinematik viskozitesini büyük oranda artırmış ve soğukta filtre tıkanma noktası sıcaklığını ise 3°C düşürmüştür. B20 yakıtına 50 ppm, 100 ppm ve 200 ppm konsantrasyonunda bor oksit nanoparçacıklarının eklenmesi halinde yakıtların kinematik viskoziteleri B20 yakıtına göre sırası ile %6,04, %19,94 ve %21,15 oranında artmıştır. Bor oksit nanoparçacıkları yakıtın ısı değerini ve destilasyon sıcaklıklarını düşürmüştür. Bor oksit nanoparçacıklarının ilavesi ile destilasyon sıcaklıklarının düşmesi B20 yakıtının buharlaşma karakteristiği iyileştiren bir durumdur. Kanola yağı biyodizeli yüksek kaynama noktası sıcaklığına sahip büyük molekül kütleli yağ asitleri içerdiği için buharlaşma karakteristiği dizel yakıtına göre kötüdür. Bor oksit nanoparçacıklarının ısı iletim katsayısının yüksek olması B20 yakıtının daha hızlı buharlaşmasını sağlayarak destilasyon sıcaklıklarını düşürmüş olabilir.

#### 3.2. Yanma Karakteristikleri (Combustion Characteristics)

Bor oksit nanoparçacıklarının tam yükte silindir basıncı, net ısı yayılımı ve basınç artış oranına etkisi sırası ile Şekil 4, Şekil 5 ve Şekil 6'da verilmiştir. Şekil 4'te görüldüğü üzere yanma başlamadan önce ve yanma başladıktan sonra kontrolsüz yanma safhasının ortasına kadar nanoyakıtlar B20 yakıtına göre daha düşük silindir basıncı oluşturmuştur. Bu durumun nedeni nanoparçacıklar yakıtın ısı iletim katsayısını ve dolayısı ile silindir içinde sıcak gazlardan yakıt moleküllerine doğru olan ısı transferini arttırması olabilir. Bor oksit nanoparçacıklarının 100 ppm ve 200 ppm konsantrasyonunda kullanılması halinde maksimum silindir basıncının hafif şekilde arttığı görülmüştür. B20, B20BO50 B20BO100 ve B20BO200 yakıtları için maksimum silindir basıncı değerleri sırası ile 368° KMA'da

**Tablo 2.** Test yakıtlarının bazı fiziksel-kimyasal yakıt özellikleri (Some physical-chemical fuel properties of test fuels).

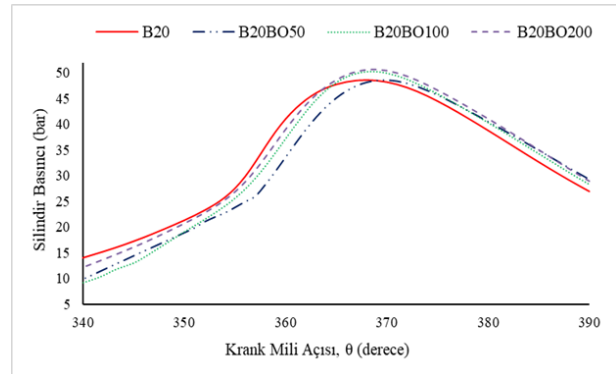
| Özellikler                     | Test Metodu           | Birim              | Hata payı | B20   | B20BO50 | B20BO100 | B20BO200 |
|--------------------------------|-----------------------|--------------------|-----------|-------|---------|----------|----------|
| Yoğunluk (15°C)                | TS EN ISO 12185       | kg/m <sup>3</sup>  | ±0,01     | 844,5 | 844,3   | 844,3    | 844,3    |
| Dinamik Viskozite (40°C)       | DIN 53015/ISO 12058   | mPas (cP)          | ±0,05     | 2,77  | 2,95    | 3,33     | 3,35     |
| Kinematik Viskozite (40°C)     | -*                    | mm <sup>2</sup> /s | -         | 3,31  | 3,51    | 3,97     | 4,01     |
| Parlama Noktası                | TS EN ISO 2719        | °C                 | ±0,5      | 66,0  | 68,0    | 68,0     | 68,0     |
| Üst Isıl Değer                 | ASTM D 240            | kJ/kg              | ±10       | 44365 | 43811   | 43953    | 44314    |
| Soğukta Filtre Tıkanma Noktası | TS EN ISO 116         | °C                 | ±0,5      | -5,0  | -5,0    | -8,0     | -8,0     |
| Kükürt içeriği                 | TS EN ISO 20846       | mg/kg              | ±0,1      | 6,8   | 6,8     | 6,8      | 6,8      |
| Destilasyon Sıcaklıkları       | TS EN ISO 3405        | °C                 | ±0,5      |       |         |          |          |
|                                | İlk Kaynama Sıcaklığı |                    |           | 164,9 | 159,6   | 159,5    | 159,9    |
|                                | 10 hac. %             |                    |           | 221,8 | 215,3   | 218,1    | 216,7    |
|                                | 50 hac. %             |                    |           | 299,4 | 297,4   | 298,5    | 297,6    |
|                                | 90 hac. %             |                    |           | 341,9 | 341,5   | 341,3    | 341,6    |
|                                | 95 hac. %             |                    |           | 351,3 | 351,4   | 351,1    | 351,7    |
|                                | Son Kaynama Sıcaklığı |                    |           | 359,5 | 357,8   | 356,7    | 357,7    |

\*Kinematik viskozite değerleri, yakıtın ölçülen dinamik viskozite değerinin 40°C'de ölçülen yoğunluk değerine bölünmesi ile hesaplanmıştır.

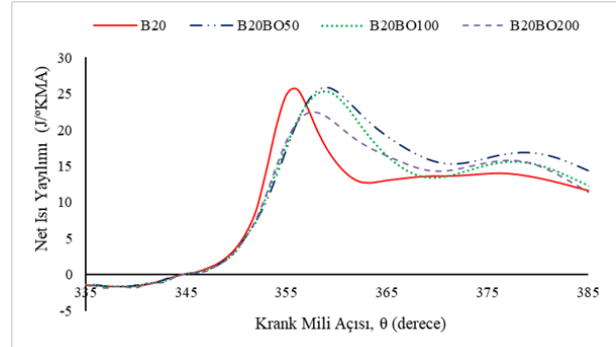
48,69, 370° KMA'da 48,60 bar, 368° KMA'da 50,31 bar ve 369° KMA'da 50,61 bar olarak ölçülmüştür. Genişleme strokunda silindir basıncının krank miline göre değişimi yanma öncesinde görülen durumun tersidir. Diğer bir ifade ile genişleme strokunda nanoyakıtlar B20 yakıtına göre silindir basıncını yükseltmiştir. Bunun nedeni net ısı yayılım grafiğinden görüldüğü tüm yakıtlar için yanma aynı krank mili açısında başlamasına rağmen nanoyakıt kullanımında yanmanın dolayısı ile net ısı yayılımının genişleme zamanına doğru uzamasıdır. Bor oksit nanoparçacıkları yakıtın ilk kaynama noktası sıcaklığı ile T10 ve T50 destilasyon sıcaklıklarını düşürdüğü halde yüksek viskozite nedeni ile tutuşma gecikmesinden sonra karışım oluşum hızını yavaşlattığı düşünülmektedir. Bu durumda difüzyonlu yanma fazı artmıştır. B20, B20BO50 B20BO100 ve B20BO200 yakıtları için maksimum net ısı yayılımının gerçekleştiği krank mili açısı ve değeri sırasıyla 356° KMA'da 25,70 J/°KMA, 359° KMA'da 25,93 J/°KMA, 359° KMA'da 25,32 J/°KMA ve 358° KMA'da 22,41 J/°KMA olarak belirlenmiştir. Bor oksit nanoparçacıkları içeren nanoyakıtlar yanma hızını düşürdüğü için basınç artış oranının da düşmesine neden olmuştur. B20, B20BO50 B20BO100 ve B20BO200 yakıtları için maksimum basınç artış oranının gerçekleştiği krank mili açısı ve değeri sırasıyla 358° KMA'da 3,01 bar/°KMA, 358° KMA'da 2,77 bar/°KMA, 358° KMA'da 2,75 bar/°KMA ve 357° KMA'da 2,89 bar/°KMA olarak belirlenmiştir. Tüm yakıtlar için tutuşma gecikmesi süresinin aynı oluşu (7° KMA) ancak bor oksit nanoparçacıkları kullanımında yanma süresinin uzadığı tespit edilmiştir. B20, B20BO50 B20BO100 ve B20BO200 yakıtları için yanma süresi sırası ile 65° KMA, 77° KMA, 78° KMA ve 78° KMA olarak gerçekleşmiştir. Net ısı yayılımı grafiğinden anlaşılabileceği üzere bor oksit nanoparçacıkları kullanımında yanma genişleme strokuna doğru kaymıştır. Bu durum yanma süresinin uzamasına neden olmuştur.

### 3.3. Motor Performans Karakteristikleri (Engine Performance Characteristics)

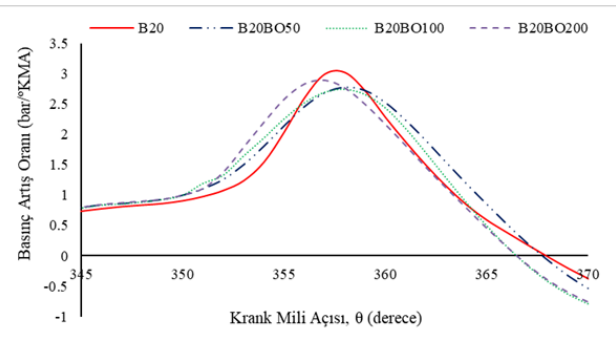
B20 ve bor oksit nanoparçacıkları içeren nanoyakıtların motorun özgül yakıt tüketimi ve efektif verimine



**Şekil 4.** Tam yükte silindir basıncının test yakıtlarına göre değişimi (Variation of cylinder pressure at full load for test fuels).

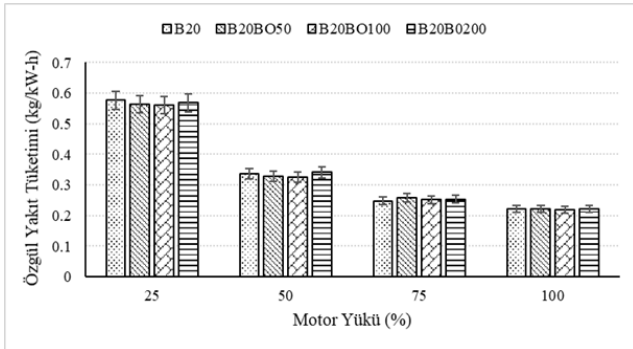


**Şekil 5.** Tam yükte net ısı yayılımının test yakıtlarına göre değişimi (Variation of net heat release rate at full load for test fuels).

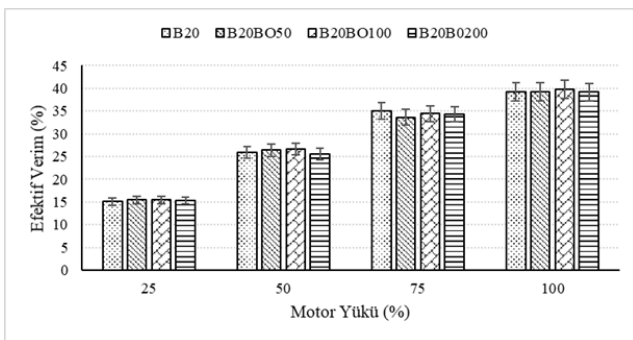


**Şekil 6.** Tam yükte basınç artış oranının test yakıtlarına göre değişimi (Variation of rate of pressure rise at full load for test fuels).

etkisini gösteren grafikler sırası ile Şekil 7 ve Şekil 8'de verilmiştir. Bu grafiklerden görüldüğü gibi, özgül yakıt tüketimi ve efektif verim değerlerinde gözlemlenen hafif değişimlerin bor oksit nanoparçacık konsantrasyonu ile orantılı olmadığı belirlenmiştir. Bununla birlikte ortalama özgül yakıt tüketimi değerleri ve ortalama efektif verim değerleri incelendiğinde B20BO50 ve B20BO200 nanoyakıtların neden olduğu değişimler hata değerlerinin altında kaldığı tespit edilmiştir. Fakat B20BO100 nanoyakıt kullanımında, B20 yakıtına göre ortalama özgül yakıt tüketiminin %1,66 oranında azaldığı ve efektif verimin ortalama %0,96 oranında arttığı belirlenmiştir. Dolayısı ile bor oksit nanoparçacıklarının motor performansı üzerindeki olumlu etkisi 100 ppm konsantrasyonunda daha belirgin olarak ortaya çıkmıştır. 50 ppm bor oksit nanoparçacık konsantrasyonun motor performansını iyileştirmede yetersiz kaldığı söylenebilir. Ancak bor oksit nanoparçacıklarının 200 ppm oranında kullanılması halinde yakıtın kinematik viskozitesinin %21,15 oranında yükselmesi motor performansındaki artışı engellemiştir.



**Şekil 7.** B20 ve bor oksit nanoparçacıklarının özgül yakıt tüketimine etkisi (The effect of B20 and boron oxide nanoparticles on the brake specific fuel consumption).

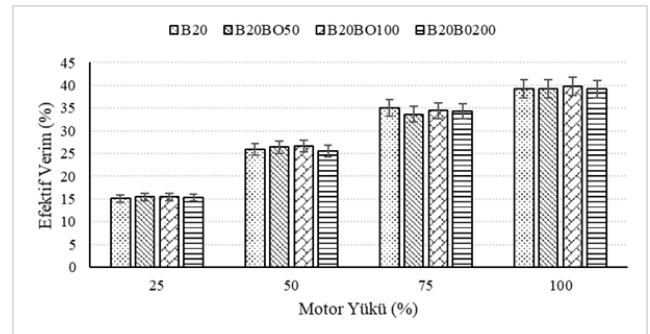


**Şekil 8.** B20 ve bor oksit nanoparçacıklarının efektif verime etkisi (The effect of B20 and boron oxide nanoparticles on the thermal efficiency).

### 3.4. Egzoz Emisyonları (Exhaust Emissions)

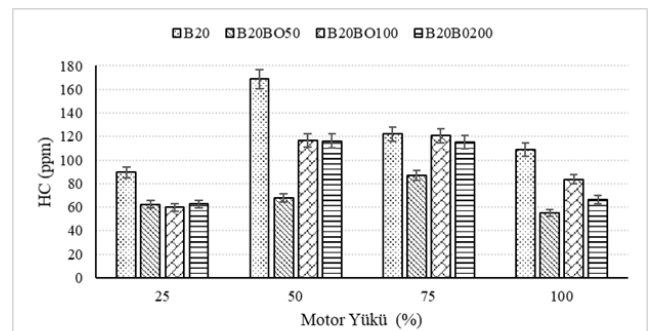
Bor oksit nanoparçacıklarının CO emisyonuna etkisi Şekil 9'da verilmiştir. Grafikten, bor oksit nanoparçacıklarının 50 ppm ve 200 ppm konsantrasyonunda kullanıldığı durumda CO emisyonunun arttığı fakat 100 ppm bor oksit konsantrasyonunda hafif bir düşmenin meydana geldiği görülebilir. B20BO50 ve B20BO200

nanoyakıtları, ortalama CO emisyonunu B20 yakıtına göre sırası ile %6,44 ve %22,38 oranında yükseltmiştir. B20BO100 nanoyakıtı ise ortalama CO emisyonunu %1,29 oranında düşürmüştür. Nanoparçacıkların katalitik etkisi ve yüksek yüzey alanı/hacim oranı yanmayı iyileştirir ancak bu etkiler düşük bor oksit nanoparçacık konsantrasyonu (50 ppm) nedeni ile B20B50 nanoyakıtı kullanımında yetersiz kaldığı değerlendirilmektedir. Yüksek bor oksit nanoparçacık konsantrasyonunda (200 ppm) ise yüksek viskozite nedeni ile yanmanın kötüleştiği ve bu nedenle CO emisyonunun arttığı düşünülmektedir. Dolayısı ile CO emisyonu için en uygun nano bor oksit konsantrasyonunun 100 ppm olduğu belirlenmiştir.



**Şekil 9.** B20 ve bor oksit nanoparçacıklarının CO emisyonuna etkisi (The effect of B20 and boron oxide nanoparticles on the CO emission).

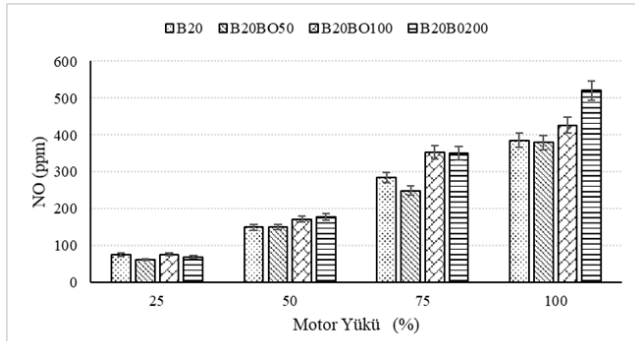
Bor oksit nanoparçacık içeren nanoyakıtların HC emisyonuna etkisini gösteren grafik Şekil 10'da verilmiştir. Nanoyakıtlar tüm yük noktalarında HC emisyonunu B20 yakıtına göre azaltmıştır. Ortalama HC emisyonu değerlerine bakıldığında B20BO50, B20BO100 ve B20BO200 nanoyakıtları B20 yakıtına kıyasla sırası ile %44,41, %22,12 ve %26,38 oranında daha az HC emisyonu oluşumuna neden olmuştur. Bu sonuç bor oksit nanoparçacıklarının katalitik etkisinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Nanoparçacıklar yanma ortamında katalitik etki göstererek hidrokarbon moleküllerinin oksitlenmesi için gerekli aktivasyon enerjisini düşürür ve sonuçta daha verimli bir yanma sağlar [12]. Ancak bu etki yüksek nanoparçacık konsantrasyonunda artan viskozite nedeni ile kısmen azalmış olduğu



**Şekil 10.** B20 ve bor oksit nanoparçacıklarının HC emisyonuna etkisi (The effect of B20 and boron oxide nanoparticles on the HC emission).

düşünülmektedir.

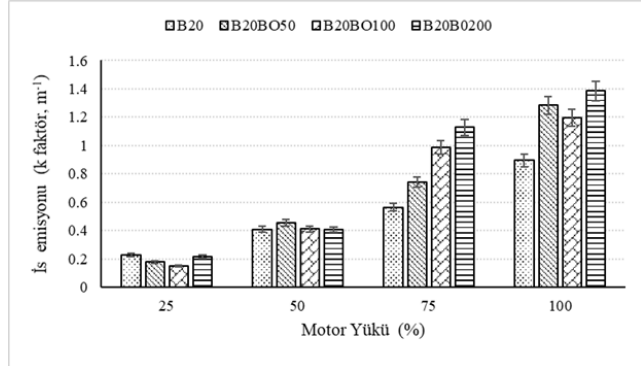
B20 ve bor oksit içeren nanoyakıtların NO emisyonuna etkisi Şekil 11'deki grafikte gösterilmiştir. Şekil incelendiğinde B20BO50 nanoyakıtı genel olarak NO emisyonunu düşürdüğü ancak diğer nanoyakıtların NO emisyonunu artırdığı görülebilir. Ortalama NO emisyonu değerleri karşılaştırıldığında B20BO50 nanoyakıtı B20 yakıtına göre NO emisyonunu %6,05 oranında düşürmüş, B20BO100 ve B20BO200 nanoyakıtları ise B20 yakıtına göre sırasıyla %14,90 ve %25,08 oranında daha fazla NO emisyonu oluşumuna neden olmuştur. İçten yanmalı motorlarda  $\text{NO}_x$  emisyonlarının çok büyük bir kısmı termal  $\text{NO}_x$  oluşum mekanizması ile oluşmaktadır [41]. Termal NO oluşum mekanizmasında yanma süresi, sıcaklık ve yerel oksijen konsantrasyonu arttıkça  $\text{NO}_x$  emisyonu oluşumu da artmaktadır [42]. Bor oksit nanoparçacık kullanımında yanma süresinin uzaması NO oluşumunu artırmış olabilir. Ayrıca nanoparçacıkların katalitik etkisi nedeni ile yerel bölgelerde yanma sıcaklığı yükselmiş olabilir. Bu etkiler yüksek konsantrasyonda bor oksit nanoparçacık kullanımında NO emisyonunu artırmıştır. Yüksek viskozite zengin karışım bölgelerini genişleterek yerel sıcaklıkların yükselmesine ve buna bağlı olarak daha fazla  $\text{NO}_x$  emisyonu oluşumuna neden olur [43]. 100 ppm ve 200 ppm bor oksit nanoparçacık konsantrasyonunda NO oluşumunun artmasının nedenlerinden biri de yakıtın yüksek kinematik viskozitenin olabileceği değerlendirilmiştir.



**Şekil 11.** B20 ve bor oksit nanoparçacıklarının NO emisyonuna etkisi (The effect of B20 and boron oxide nanoparticles on the NO emission).

B20 ve bor oksit içeren nanoyakıtların is emisyonuna etkisini gösteren grafik Şekil 12'de verilmiştir. Grafikte görüldüğü gibi %25 motor yükü hariç diğer tüm yük noktalarında nanoyakıtlar is emisyonunu artırmıştır. Düşük motor yükünde püskürtülen yakıt miktarının az ve hava fazlalık katsayısının yüksek olması nedeni ile is emisyonları düşük seviyede kalmıştır. Düşük yanma odası sıcaklığında bor oksit nanoparçacıkları yakıtın kolayca buharlaşmasını sağlayarak ve oluşturduğu katalitik etki sonucu is oluşumunu azaltmış olabilir. Ancak yüksek motor yüklerinde püskürtülen nanoyakıt miktarının artması yanma ortamında partikül madde oluşumunu hızlandıracak olan nanoparçacık sayısının da artmasına neden olmaktadır. Metal esaslı nano-

parçacıkların kullanımında olduğu gibi bor oksit nanoparçacıkları yüksek erime noktası sıcaklığı ( $460^{\circ}\text{C}$ ) ve kaynama noktası sıcaklığı ( $2250^{\circ}\text{C}$ ) nedeni ile yanma ortamında katı fazda kalabilirler. Nanoparçacıklar partikül madde oluşumunda çekirdek görevi gördüğü ve partikül sayısını artırdığı için is emisyonu oluşumunu hızlandırır [44]. Nanoparçacıklar her ne kadar katalitik etkileri sonucu partikül maddelerin yüzeyine yoğunlaşmış olan HC moleküllerinin oksidasyon sıcaklığını düşürerek yanmalarını sağlasa da katı formdaki nanoparçacıklarının varlığı partikül madde emisyonunu (partikül madde sayısını) artırmaktadır [45]. Bu etkilerden dolayı bor oksit nanoparçacıkları is emisyonunu artırmıştır. B20BO50, B20BO100 ve B20BO200 nanoyakıtları ortalama is emisyonunu B20 yakıtına göre sırası ile %26,65, %31,03 ve %49,72 oranında yükseltmiştir. Yoğunluk, T95 destilasyon sıcaklığı ve yakıtın kükürt ve aromatik hidrokarbon içeriği gibi bazı yakıt özellikleri is oluşumu üzerinde son derece etkilidir [46]. Fakat Tablo 2 incelendiğinde B20 yakıtına bor oksit nanoparçacıklarının eklenmesi durumunda söz konusu yakıt özelliklerinde kayda değer bir değişimin meydana gelmediği görülebilir. Bu nedenle bor oksit nanoparçacıkları kullanımında is emisyonu oluşumu yakıt özelliklerinden ziyade yanma ortamındaki katı bor oksit nanoparçacıklarının varlığından etkilendiği söylenebilir. Karışımdaki bor oksit nanoparçacık konsantrasyonu artırıldıkça is emisyonunun da artması bu durumu destekler niteliktedir.

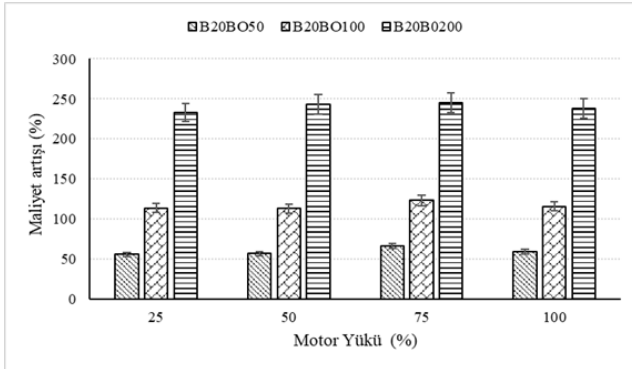


**Şekil 12.** B20 ve bor oksit nanoparçacıklarının is emisyonuna etkisi (The effect of B20 and boron oxide nanoparticles on the soot emission).

### 3.5. Maliyet Analizi (Cost Analysis)

Bor oksit nanoparçacıkları içeren yakıtların B20 referans yakıtına göre maliyet artışına etkisi Şekil 13'teki grafikte verilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi nanoyakıtlar B20 yakıtına göre %55 ile %245 aralığında değişen oranlarda maliyet artışına neden olmuştur. Maliyetteki bu artış %25 motor yükünden %75 motor yüküne kadar hafif şekilde artarak devam etmiş ve %75 yükünde maksimum olmuştur. Tam yükte minimum özgül yakıt tüketiminin gerçekleşmesi maliyette bir miktar azalmaya neden olmuştur. B20BO100 nanoyakıtı, ortalama özgül yakıt tüketimini %1,66 oranında düşürmesine rağmen bor oksit nanoparçacıklarının yüksek fiyatı nedeni ile B20 yakıtına kıyasla maliyette %113-%123

oranında artışa yol açmıştır. Bu noktadan bakıldığında, günümüzde bor oksit nanoparçacıklarının yakıt katkısı olarak ticari kullanımı ekonomik açıdan bir kazanç sağlamayacaktır. Benzer sonuçlar Ahmed vd. [8] tarafından da paylaşılmıştır. Araştırmacılar, dizel yakıtına 50 mg, 100 mg ve 150 mg grafit ve demir oksit nanoparçacıkları eklendiğinde yakıtın litre fiyatının sırası ile %2,5, %4,9 ve %7,4'e kadar yükseldiği ancak özgül yakıt tüketiminin %2,17-%2,63 oranında azaldığını belirtmiştir. Soudagar vd. [47] biyodizel ve stronsiyum-çinko oksit (Sr@ZnO) nanoparçacıklarının laboratuvar ortamında sentezlenmesi halinde ticari ürünlere göre maliyetin %60 oranında azalacağını ancak yine de nanoparçacıkların yakıt fiyatını artıracığını ifade etmiştir. Buna rağmen nanoparçacıkların performans ve egzoz emisyonu üzerindeki olumlu etkileri maliyet endişesinin üstesinden gelebileceğini vurgulamışlardır.



**Şekil 13.** Bor oksit nanoparçacıklarının B20 yakıtına göre maliyet artışına etkisi (The effect of boron oxide nanoparticles on cost increase relative to B20 fuel).

#### 4. Sonuçlar (Conclusions)

Bu çalışmada bor oksit nanoparçacıklarının dizel nanoyakıt katkısı olarak kullanılabilirliği deneysel olarak araştırılmıştır. Bor oksit nanoparçacıkları yakıtın soğukta filtre tıkanma noktası sıcaklığını iyileştirdiği ancak yakıtın kinematik viskozitesini artırdığı belirlenmiştir. Yüksek viskozite motor performansının kötüleşmesine ve egzoz emisyonlarının artmasına neden olmuştur. Bor oksit nanoparçacıklarının B20 yakıtı için 100 ppm konsantrasyonunda kullanılabilirliği belirlenmiştir. Bu durumda nanoyakıt içermeyen referans yakıt (B20) kıyasla motorun özgül yakıt tüketimi ortalama olarak %1,66 oranında azalmış ve efektif verim ise ortalama olarak %0,96 oranında artmıştır. 100 ppm bor oksit nanoparçacık konsantrasyonunda CO ve HC emisyonları azalmış fakat motorun aynı çalışma şartlarında NO ve is emisyonları artmıştır. Bor oksit nanoparçacıkları özgül yakıt tüketimini düşürmesine rağmen %99,95 saflıktaki bor oksit nanoparçacıklarının yüksek fiyatı nedeni ile yakıt maliyeti büyük oranda artmıştır. Dolayısıyla bu aşamada bor oksit nanoparçacıklarının ticari nanoyakıt katkısı olarak kullanımının ekonomik olmayacağı değerlendirilmiştir. Ancak maliyette meydana gelen

artış, egzoz emisyonları ve motor performansındaki iyileşmelere karşın göz ardı edilebilir. Bununla birlikte fayda-maliyet dengesinin sağlanması açısından daha düşük saflıkta bor oksit nanoparçacıklarının optimum konsantrasyonda kullanılması mümkün olabilir. Bor oksit nanoparçacıklarının yakıtın soğukta filtre tıkanma noktası sıcaklığını düşürmesi, biyodizelin soğuk iklim bölgelerinde kullanımını kolaylaştıran bir etkidir. Ayrıca bor oksit nanoparçacıklarının neden olduğu yüksek viskozite sorunu nanoyakıt düşük viskoziteye sahip alkoller eklenerek hafifletilebilir ve böylece performans ve emisyonlarda daha fazla iyileşme sağlanabilir. Tüm bulgular değerlendirildiğinde bor oksit nanoparçacıklarının dizel yakıt katkısı olarak kullanıma potansiyelinin olduğu görülmüştür. Ancak daha kapsamlı ve daha iyi sonuçlar elde etmek için farklı morfolojik özelliklere/çaplara sahip olan bor oksit nanoparçacıkları, farklı konsantrasyonlarda yakıtlara eklenerek değişken motor ayarlarında kapsamlı motor testlerinin yapılması gerekmektedir. Bu yönde yeni çalışmalar yapılabilir.

Ülkemizin bilim ve teknoloji politikaları yerel enerji kaynaklarının daha etkin kullanılması, mevcut enerji kaynakları için yeni kullanım alanlarının oluşturması, ithal edilen ürünlerin yerli imkânlarla üretilerek cari açığın azaltılması temelinde oluşturulmuştur. Bu çerçevede ülkemiz için stratejik öneme sahip olan bor kaynaklarının katma değerli ürünlere dönüşümünü sağlamak ve bor içerikli ürün çeşidinin artırılarak bor kaynaklarının etkin/yaygın kullanımına katkıda bulunmak üzere çalışmalar/araştırmalar yürütülmektedir. Bor oksit nanoparçacıklarının dizel yakıt katkısı olarak kullanılabilirliğinin araştırıldığı bu çalışma yukarıda ifade edilen durumlarla uyumlu olduğu söylenebilir. Çünkü henüz ticari olarak kullanımları yaygın olmasa da yakıt katkısı olarak kullanılan metal esaslı nanoparçacıkların yüksek üretim maliyeti ve üretim zorluğunun yanında, ithal ürün olmaları ülkemiz için ekonomik kayıplara neden olabilir. Yerel bor kaynaklarından üretilebilen bor oksit nanoparçacıklarının yakıt katkısı olarak değerlendirilmesi halinde söz konusu sorunlar hafifletilebilir ve bor kaynakları yeni bir alanda değerlendirilerek kullanım alanının genişletilmesine katkı sağlanabilir.

#### Teşekkür (Acknowledgement)

Bu çalışma Ondokuz Mayıs Üniversitesi Proje Yönetim Ofisi tarafından PYO. MUH.1904.19.016 proje kodu ile mali olarak desteklenmiştir. Bu makale Abdülvahap Çakmak'ın doktora tez çalışmasından üretilmiştir. Bu nedenle yazar, 2211-C Öncelikli Alanlara Yönelik Yurtiçi Doktora Burs Programı kapsamındaki destekten dolayı TÜBİTAK BİDEB'e teşekkürlerini sunar. Yazarlar, yakıt numunelerinin analizi konusundaki teknik desteklerinden dolayı Shell&Turcas Petrol, Samsun Akaryakıt Depolama A.Ş. (SADAŞ) yönetimine, yakıt analiz laboratuvarı sorumlusu Kimya Mühendisi Sayın Fatih Bilgin'e ve laboratuvar çalışanlarına, ayrıca bor oksit nanoparçacıklarının karakterizasyonu konusundaki yardımlarından dolayı Sayın Doç. Dr. Mevlüt Gürbüz'e teşekkür eder.

## Kaynaklar (References)

- [1] Soudagar, M. E. M., Nik-Ghazali, N. N., Kalam, M. A., Badruddin, I. A., Banapurmath, N. R., & Akram, N. (2018). The effect of nano-additives in diesel-biodiesel fuel blends: A comprehensive review on stability, engine performance and emission characteristics. *Energy Conversion and Management*, 178, 146-177.
- [2] Shaafi, T., Sairam, K., Gopinath, A., Kumaresan, G., & Velraj, R. (2015). Effect of dispersion of various nanoadditives on the performance and emission characteristics of a CI engine fuelled with diesel, biodiesel and blends-a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 49, 563-573.
- [3] Hatami, M., Hasanpour, M., & Jing, D. (2020). Recent developments of nanoparticles additives to the consumables liquids in internal combustion engines: Part I: Nano-fuels. *Journal of Molecular Liquids*, 318, 114250.
- [4] Gürmen, S., Ebin, B., & İTÜ, M. (2008). Nanopartiküller ve üretim yöntemleri-1 [Nanoparticles and their production methods-1]. *Metallurji [Metallurgy]*, 150, 31-38.
- [5] Liveri, V. T. (2006). *Controlled synthesis of nanoparticles in microheterogeneous systems*. Springer Science & Business Media.
- [6] Tripathi, R., Negi, P., Singh, Y., Ranjit, P. S., & Sharma, A. (2021). Role of nanoparticles as an additive to the biodiesel for the performance and emission analysis of diesel engine-A review. *Materials Today: Proceedings*, 46, 11222-11225.
- [7] Bhan, S., Gautam, R., Singh, P., & Sharma, A. (2022). A Comprehensive Review of Performance, Combustion, and Emission Characteristics of Biodiesel Blend with Nanoparticles in Diesel Engines. *Recent Trends in Thermal Engineering*, 73-88.
- [8] Ahmed, A., Shah, A. N., Azam, A., Uddin, G. M., Ali, M. S., Hassan, S., ... & Aslam, T. (2020). Environment-friendly novel fuel additives: Investigation of the effects of graphite nanoparticles on performance and regulated gaseous emissions of CI engine. *Energy Conversion and Management*, 211, 112748.
- [9] 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.
- [10] El-Seesy, A. I., Attia, A. M., & El-Batsh, H. M. (2018). The effect of Aluminum oxide nanoparticles addition with Jojoba methyl ester-diesel fuel blend on a diesel engine performance, combustion and emission characteristics. *Fuel*, 224, 147-166.
- [11] Chen, A. F., Adzmi, M. A., Adam, A., Othman, M. F., Kamaruzzaman, M. K., & Mrwan, A. G. (2018). Combustion characteristics, engine performances and emissions of a diesel engine using nanoparticle-diesel fuel blends with aluminium oxide, carbon nanotubes and silicon oxide. *Energy Conversion and Management*, 171, 461-477.
- [12] Saxena, V., Kumar, N., & Saxena, V. K. (2017). A comprehensive review on combustion and stability aspects of metal nanoparticles and its additive effect on diesel and biodiesel fuelled CI engine. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 70, 563-588.
- [13] Fayad, M. A., & Dhahad, H. A. (2021). Effects of adding aluminum oxide nanoparticles to butanol-diesel blends on performance, particulate matter, and emission characteristics of diesel engine. *Fuel*, 286, 119363.
- [14] 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.
- [15] Dinesha, P., Kumar, S., & Rosen, M. (2021). Effects of particle size of cerium oxide nanoparticles on the combustion behavior and exhaust emissions of a diesel engine powered by biodiesel/diesel blend. *Biofuel Research Journal*, 8(2), 1374-1383.
- [16] Sunil, S., Prasad, B. C., & Kakkeri, S. (2021). Studies on titanium oxide nanoparticles as fuel additive for improving performance and combustion parameters of CI engine fueled with biodiesel blends. *Materials Today: Proceedings*, 44, 489-499.
- [17] Janakiraman, S., Lakshmanan, T., & Raghu, P. (2021). Experimental investigative analysis of ternary (diesel+ biodiesel+ bio-ethanol) fuel blended with metal-doped titanium oxide nanoadditives tested on a diesel engine. *Energy*, 235, 121148.
- [18] Razzaq, L., Mujtaba, M. A., Soudagar, M. E. M., Ahmed, W., Fayaz, H., Bashir, S., ... & El-Seesy, A. I. (2021). Engine performance and emission characteristics of palm biodiesel blends with graphene oxide nanoplatelets and dimethyl carbonate additives. *Journal of Environmental Management*, 282, 111917.
- [19] Murugesan, P., Hoang, A. T., Venkatesan, E. P., Kumar, D. S., Balasubramanian, D., & Le, A. T. (2021). Role of hydrogen in improving performance and emission characteristics of homogeneous charge compression ignition engine fueled with graphite oxide nanoparticle-added microalgae biodiesel/diesel blends. *International Journal of Hydrogen Energy* (in press). <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.08.107>
- [20] Gad, M. S., & Gadow, S. I. (2021). Enhancement of combustion characteristics and emissions reductions of a diesel engine using biodiesel and carbon nanotube. Fullerenes, *Nanotubes and Carbon Nanostructures*, 29(4), 267-279.
- [21] Ghoneim, N. A., & Halawa, M. M. (1985). Effect of boron oxide on the thermal conductivity of some sodium silicate glasses. *Thermochimica Acta*, 83(2), 341-345.
- [22] Ojha, P. K., & Karmakar, S. (2018). Boron for liquid fuel Engines-A review on synthesis, dispersion stability in liquid fuel, and combustion aspects. *Progress in Aerospace Sciences*, 100, 18-45.
- [23] Akıncioğlu, G., Akıncioğlu, S., Uygur, İ., & Ötkem, H. (2019). Alternatif katkı maddesi olarak kullanılan bor oksitin fren balatasının sürtünme davranışına etkisinin incelenmesi [Investigation of the effect of boron oxide on the friction behavior of brake pads as an alternative additive]. *Journal of Boron*, 4(1), 1-6.
- [24] Eti Mine Works (2015). Boron Oxide Product Specification. <https://www.etimaden.gov.tr/rafine-urunler>
- [25] Alizadeh, M., Sharifianjazi, F., Haghshenasjazi, E., Aghakhani, M., & Rajabi, L. (2015). Production of nano-

- sized boron oxide powder by high-energy ball milling. *Synthesis and Reactivity in Inorganic, Metal-Organic, and Nano-Metal Chemistry*, 45(1), 11-14.
- [26] Huang, Z., Wu, Q., Li, X., Shang, S., Dai, X., & Yin, Y. (2010). Synthesis and characterization of nano-sized boron powder prepared by plasma torch. *Plasma Science and Technology*, 12(5), 577-580.
- [27] Kuo, K. K., Risha, G. A., Evans, B. J., & Boyer, E. (2003). Potential usage of energetic nano-sized powders for combustion and rocket propulsion. *Materials Research Society Symposium-Proceedings*, 800(1), 39-50.
- [28] Gökdağ, D., Metin, G., & Toğrul, T. (2016). Mekanokimyasal yöntemle bor oksitten elementel bor sentezlenmesi ve karakterizasyonu. *Journal of Gazi University Faculty of Engineering and Architecture*, 31(2), 425-433.
- [29] Li, Y., Wang, Y., Lv, Q., Qin, Z., & Liu, X. (2013). Synthesis of uniform plate-like boron nitride nanoparticles from boron oxide by ball milling and annealing process. *Materials Letters*, 108, 96-102.
- [30] Çakmak, A., & Özcan, H. (2021). Investigation of the usability of glycerol ethers as second-generation bio-fuel in diesel engine. *Journal of Thermal Science and Technology*, 41(2), 191-204.
- [31] Çakmak, A. (2021). *Experimental investigation of the improvement of combustion, performance and emission characteristics of a diesel engine by using produced different fuel additives* [Ph.D. Thesis, Ondokuz Mayıs University]. Council of Higher Education Thesis Center. (Thesis Number: 704351).
- [32] Kline, S. J., & McClintock F. A. (1953). Describing uncertainties in single-sample experiments. *Mechanical Engineering*, 75, 3-8.
- [33] Holman, J. P. (2012). *Experimental methods for engineers (8th ed.)*. New York: McGraw Hill Book. ISBN 0071326480
- [34] Sahin, Z., Aksu O. N., & Bayram, C. (2021). The effects of n-butanol/gasoline blends and 2.5% n-butanol/gasoline blend with 9% water injection into the intake air on the SIE engine performance and exhaust emissions. *Fuel*, 303, 121210.
- [35] Duan, X., Li, Y., Liu, J., Guo, G., Fu, J., Zhang, Q., ... & Liu, W. (2019). Experimental study the effects of various compression ratios and spark timing on performance and emission of a lean-burn heavy-duty spark ignition engine fueled with methane gas and hydrogen blends. *Energy*, 169, 558-571.
- [36] Gumus, S., Özcan, H., Özbey, M., & Topaloglu, B. (2016). Aluminum oxide and copper oxide nanodiesel fuel properties and usage in a compression ignition engine. *Fuel*, 163, 80-87.
- [37] Muruganantham, P., Pandiyan, P., & Sathyamurthy, R. (2021). Analysis on performance and emission characteristics of corn oil methyl ester blended with diesel and cerium oxide nanoparticle. *Case Studies in Thermal Engineering*, 26, 101077.
- [38] Durgun, O. (1990). *Motorlarda deneysel yöntemler*. [Ders notu] Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Trabzon.
- [39] Çakmak, A., & Bilgin, A. (2017). Exergy and energy analysis with economic aspects of a diesel engine running on biodiesel-diesel fuel blends. *International Journal of Exergy*, 24(2-4), 151-172.
- [40] Bilgin, A., & Sezer, I. (2008). Effects of methanol addition to gasoline on the performance and fuel cost of a spark ignition engine. *Energy & Fuels*, 22(4), 2782-2788.
- [41] Heywood, J. B. (1998). *Internal combustion engine fundamentals*. New York: McGraw-Hill. ISBN 1260116115.
- [42] Stone, R. (1999). *Introduction to internal combustion engines*. London: Macmillan. ISBN 0768004950.
- [43] Shehata, M. S. (2013). Emissions, performance and cylinder pressure of diesel engine fuelled by biodiesel fuel. *Fuel*, 112, 513-522.
- [44] Zhang, Z., Lu, Y., Wang, Y., Yu, X., Smallbone, A., Dong, C., & Roskilly, A. P. (2019). Comparative study of using multi-wall carbon nanotube and two different sizes of cerium oxide nanopowders as fuel additives under various diesel engine conditions. *Fuel*, 256, 115904.
- [45] Zhang, Z. H., & Balasubramanian, R. (2017). Effects of cerium oxide and ferrocene nanoparticles addition as fuel-borne catalysts on diesel engine particulate emissions: Environmental and health implications. *Environmental Science & Technology*, 514248-514258.
- [46] Elżbieta, D., Małgorzata, S., Pośniak, M., Andrzej, S., Bartosz, P., & Woodburn, J. (2020). Exhaust emissions from diesel engines fuelled by different blends with the addition of nanomodifiers and HVO. *Environmental Pollution*, 259, 113772.
- [47] 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.