

## Dizel Motorlarda Bütanol-Dizel Yakıt Karışımı Kullanılmasının Çevrimsel Farklara Etkisinin Araştırılması

Samet GÜRGEN <sup>a(\*)</sup> İsmail. ALTIN<sup>b</sup>

### Yayın Geliş Tarihi

15 Ağustos 2020

### Yayına Kabul Tarihi

04 Eylül 2020

### Elektronik Yayın Tarihi

02 Kasım 2020

*Araştırma Makalesi*

### Anahtar Kelimeler

*Dizel Motor*

*Çevrimsel Farklar*

*Bütanol-dizel yakıt karışımı*

### Öz

Bu çalışmada dizel motorlarında bütanol-dizel yakıt karışımı kullanılmasının çevrimsel farklara etkisi incelenmiştir. Motor performansını ve egzoz emisyonlarını olumsuz yönde etkileyen çevrimsel farklılık, hem maksimum silindir basıncı hem de ortalama indike basınç parametreleri yardımıyla hesaplanarak karşılaştırmalar yapılmıştır. Deneysel çalışmalar için tek silindirli, hava soğutmalı ve dört zamanlı bir dizel motoru kullanılmış ve saf dizel yakıtına hacimce %3 (%3 bütanol + %97 dizel yakıtı), %9 ve %15 olmak üzere üç farklı oranda bütanol eklenerek ardışık 100 çevrim analiz edilmiştir. Çalışma sonunda dizel yakıtına bütanol eklenmesinin çevrimsel farkları arttırdığı görülmüştür. Ayrıca iki farklı basınç parametresi kullanılarak hesaplanan sonuçların birbiri ile uyumlu olduğu belirlenmiştir. Saf dizel yakıtı için  $COV_{P_{max}}$  değeri % 0,78 olarak hesaplanmış bu değer B15 yakıtı için % 0,85'e çıkmıştır.  $COV_{P_{mi}}$  değeri saf dizel yakıtı için % 1,14 olarak hesaplanırken B15 yakıtı için bu değer % 1,49'a yükselmiştir.

## Investigation of the Effect of Using Butanol-Diesel Fuel Blends on Cyclic Variability in Diesel Engines

### Article Submitted

15 August 2020

### Article Accepted

04 September 2020

### Available Online

02 November 2020

*Research Article*

### Keywords


*Diesel Engine*

*Cyclic Variability*


*Butanol-diesel fuel blend*

### Abstract

In this study, the effect of using butanol-diesel fuel blend on cyclic variability in diesel engines was investigated. The cyclic variability, which adversely affects engine performance and exhaust emissions, was calculated with the help of both maximum cylinder pressure and mean indicated pressure parameters and comparisons were carried out. For the experimental studies, a single cylinder, air-cooled, four-stroke diesel engine was used, and three different proportions of butanol (3%, 9% and 15% by volume) were added to pure diesel fuel and 100 consecutive cycles were analyzed. At the end of the study, it was seen that the cyclic variability of adding butanol to diesel fuel increased. In addition, the results calculated using two different pressure parameters were found to be compatible with each other.  $COV_{P_{max}}$  value was calculated as 0.78% for pure diesel fuel, and this value increased to 0.85% for B15 fuel. While the  $COV_{P_{mi}}$  value was calculated as 1.14% for pure diesel fuel, this value increased to 1.49% for B15 fuel.

<sup>a</sup>  İskenderun Teknik Üniversitesi, Barbaros Hayrettin Gemi İnşaatı ve Denizcilik Fakültesi, Hatay, Türkiye.

<sup>(\*)</sup> Sorumlu Yazar: Samet GÜRGEN, [samet.gurgen@iste.edu.tr](mailto:samet.gurgen@iste.edu.tr).

<sup>b</sup>  Karadeniz Teknik Üniversitesi, Sürmene Deniz Bilimleri Fakültesi, Trabzon, Türkiye, [isaltin@ktu.edu.tr](mailto:isaltin@ktu.edu.tr).

## 1. Giriş

Günümüzde dizel motorlar, yüksek verime ve düşük özgül yakıt tüketimine sahip olduğu için birçok alanda kullanılmaktadır. Bu alanlardan biri olan denizcilik sektörü düşünüldüğünde, gemilerin yaklaşık %98'inin dizel motoru kullandığı görülmektedir. Fakat bu motorlar tarafından salınan zararlı atık gazlar her geçen yıl etkisini artırmakta ve bununla ilgili çeşitli kısıtlamalar getirilmektedir. Emisyonları azaltmak için geliştirilen tekniklerin yanında yakıt ile ilgili de çalışmalar sürdürülmektedir. Dizel motorlarında kullanılabilecek alternatif yakıtların başında biyodizel ve karışım yakıt bileşeni olarak alkoller gelmektedir. Yenilenebilir olarak üretilebilen bütanol, özellikle son yıllarda artan bir ilgi görmektedir (Gürgen vd., 2017; 581-589).

Bütanol-dizel yakıt karışımı kullanılan dizel motorlarda motor performansı ve egzoz emisyonları ile ilgili oldukça fazla çalışma bulunmaktadır (D. Rakopoulos vd., 2010; 2781-2790; D. Rakopoulos vd., 2011; 1855-1867; D. C. Rakopoulos vd., 2010; 1989-1997; Şahin ve Aksu, 2015; 279-290). Bununla beraber çevrimsel farkların araştırıldığı kısıtlı sayıda çalışma yapılmıştır (Gürgen vd., 2018; 538-544; C. D. Rakopoulos vd., 2019; 1145-1157). İçten yanmalı motorlarda çevrimsel farklar, yakıt tüketimini ve egzoz emisyonlarını önemli ölçüde etkileyen, yanma süreciyle ilişkili önemli bir parametredir. Buji ateşlemeli motorlarda çevrimsel farklarla ilgili oldukça fazla sayıda çalışma yapılmıştır. Bununla beraber dizel motorlarda çevrimsel farkları araştıran sınırlı sayıda çalışma bulunmaktadır. Genel olarak bir dizel motorunda yanma işleminin kararlı olduğu kabul edilmektedir. Fakat, dizel yakıtına alternatif bir yakıt eklenmesi, yanma kararlılığını etkilemekte ve çevrimsel farklara sebep olmaktadır (Gürgen vd., 2018; 538-544; Tang, vd., 2011; 1-4). Özellikle alternatif yakıtlar kullanıldığı durumlarda çevrimsel farkların önemi arttığı için bu konu ile ilgili çalışmalara son yıllarda büyük önem verilmektedir. Bu çalışmalardan bazıları aşağıda verilmiştir.

Selim (2005) tarafından yapılan çalışmada çift yakıtlı motorda çevrimsel farklar deneysel olarak incelenmiştir. Çalışmada saf dizel yakıtının yanında dizel+LPG ve dizel+metan karışımları da kullanılmıştır. Burada dizel yakıtı pilot yakıt olarak LPG ve metan ise ana yakıt olarak kullanılmıştır. Çeşitli parametreler değiştirilerek bunların çevrimsel farka etkisi incelenmiştir. En fazla çevrimsel fark LPG kullanıldığında en az ise saf dizel yakıtı kullanıldığında meydana gelmiştir. Her bir yakıt için çevrimsel farklar genellikle yük arttıkça artmıştır.

Rakopoulos vd. (2008) etanol-dizel yakıtı karışımlarının, yanmadaki çevrimsel farklara etkisini stokastik analiz yöntemi ile incelemişlerdir. Çevrimsel farkların tespit edilmesi için basınç parametreleri (maksimum basınç ve ortalama indike efektif basınç), dinamik enjeksiyon zamanlaması ve tutuşma gecikmesi kullanılmıştır. Çalışma sonucunda, değişim katsayısı ( $COV_{imep}$ ) değeri etanol karışımı kullanıldığı durumda artış göstermiştir.

Tang vd. (2011) çalışmalarında yanma işlemindeki çevrimsel farkları; ortalama efektif basınç, maksimum basınç, maksimum basınç artma oranı ve maksimum ısı salınım oranı cinsinden incelemişlerdir. Çalışmada yakıt olarak biyodizelin dört farklı karışım durumu (B0, B20, B50 ve B100) incelenmiştir. Çevrimsel farklar ortalama indike efektif basınç cinsinden incelendiğinde aynı biyodizel karışım oranı için tam yükte, yarım yük durumuna göre yaklaşık %50 azaldığı belirlenmiştir. Maksimum basınç cinsinden yaptıkları incelemede ise karışım oranı arttıkça çevrimsel farkın azalma eğiliminde olduğu görülmüştür. Maksimum basınç artma oranı cinsinden incelendiğinde ise çevrimsel farkların %10'un üzerine çıktığı ayrıca tam yük durumu için ise karışım oranı arttıkça çevrimsel farkların azalma eğilimine girdiği görülmüştür. Yarım yük durumunda ise tam yük durumuna göre daha fazla çevrimsel fark meydana gelmiş ve değişim miktarında dalgalanmalar görülmüştür. Son olarak ise çevrimsel farkları maksimum ısı salınım cinsinden incelemişlerdir. Tam yük durumunda daha az çevrimsel farklar meydana gelmiş ve karışım oranı arttıkça çevrimsel farklar da azalmıştır.

Ceviz vd. (2011) çalışmalarında fındık yağından elde edilmiş biyodizelin %20, %40, %60, %80 ve %100 oranında kullanılmasıyla elde edilmiş karışım yakıtlarının, ortalama indike efektif basınç ve maksimum basınç cinsinden çevrimsel farklarını hesaplamışlardır. Saf dizel için  $COV_{imep}$  değeri % 5,51 ve  $COV_{pmax}$  değeri % 2,22 olarak bulunmuştur. Karışım oranı arttıkça tüm motor devirleri için çevrimsel farklarda azalma meydana gelmiştir. Fakat B20 karışımı için durum biraz farklı çıkmıştır. Diğer karışımların aksine B20 karışımı kullanıldığı zaman çevrimsel farklarda artma meydana gelmiştir. Ayrıca, efektif basınç, özgül yakıt tüketimi, ortalama indike efektif basınç ve maksimum basınç değişim katsayısı arasında iyi bir ilişki ortaya çıkmıştır. Motorun efektif verimi ve çevrimsel farkların ( $COV_{imep}$  ve  $COV_{pmax}$ ) yüksek olduğu durumda özgül yakıt tüketiminin fazla olduğu belirlenmiştir.

Bekal ve Babu (2011) yaptıkları çalışmada dört farklı püskürtme zamanı (ÜÖN'den 21,5-23-24,5-27,5° önce) ve üç farklı püskürtme basıncı (190, 220 ve 250 bar) için çevrimsel farkları incelemişlerdir. Yakıt olarak hint kayın ağacı ve ayçiçeğinden elde edilen metil ester-dizel yakıtı karışımları (B2, B5, B10, B20, B40, B60 ve B80) kullanılmıştır.

Çevrimsel farkların hesabı için maksimum silindir basıncı kullanılarak değişim katsayısı hesaplanmıştır. Sonuçlar incelendiğinde, püskürtme zamanı olarak en az çevrimsel fark ÜÖN'den 23 ve 24,5° KMA önce olduğu zaman görülmüştür. Püskürtme basıncının 220 bar olduğu durumda ise çevrimsel fark maksimum olmuştur. Ayrıca kısmi yüklerde çevrimsel fark tam yük durumuna göre daha fazla çıkmıştır. Çalışmadan çıkan diğer bir önemli sonuç ise; çoğu durum için çevrimsel farkın yüksek olduğu şartlarda özgül enerji tüketiminin de yüksek olmasıdır.

Mei vd. (2014) dimetilkarbonat-dizel yakıtı karışımı kullandıkları çalışmalarında çevrimsel farkları araştırmışlardır. Değişim katsayısı hem ortalama indike efektif basınç hem de maksimum basınç cinsinden hesaplanmıştır. Sonuç olarak dizel yakıtına %10 oranında dimetilkarbonat eklenmesiyle hazırlanan karışım için çevrimsel farklar dizel yakıtına göre daha fazla çıkmıştır. Tutuşmadaki karmaşık olayların tekrarlanabilirliği ve alev yayılması kötüleşmiş bu da çevrimsel farkların artmasına sebep olmuştur. Aynı durum maksimum basınç cinsinden hesaplanan sonuçlarda da çıkmıştır. Çalışmada ayrıca EGR'nin çevrimsel farklara etkisi de incelenmiş ve EGR oranı arttıkça hem saf dizel hem de karışım yakıt durumunda çevrimsel farklar artmıştır. EGR oranının artmasıyla birim karışım hacmine düşen yakıt ve oksijen seviyesi azalmaktadır. Fazla miktarda atık egzoz gazı kötü bir atmosfer oluşturur ve alev ilerleme hızını düşürmekte ve bu durum ise yanma işlemindeki kararsızlıkları arttırmaktadır.

Gürgen vd. (2017) dizel motorlarda etanol-dizel ve bütanol-dizel yakıt karışımları kullanılmasının çevrimsel farklara etkisini incelemişlerdir. Çalışmada saf dizel yakıtına %5 ve %10 oranında etanol veya bütanol eklenerek tam gaz konumunda, 1000 dev/dak ve 2000 dev/dak devir sayısında deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Çevrimsel farkların hesaplanmasında yalnızca ortalama indike basınç parametresi kullanılmıştır. Çalışma sonunda, dizel yakıtında alkol oranının artmasının çevrimsel farkları arttırdığı ve bu artışın etanolde daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca düşük devir sayılarında çevrimsel farkların yüksek devir sayılarına göre daha fazla olduğu belirlenmiştir.

Gürgen vd. (2018) tarafından yapılan diğer bir çalışmada dizel motorlarda bütanol-dizel yakıt karışımı kullanılmasının çevrimsel farklara etkisi yapay sinir ağları (YSA) ile modellenmiştir. Çalışma, tam gaz konumunda, 10 farklı devir sayısında ve 6 farklı karışım oranında yapılmıştır. Ortalama indike basınç parametresi kullanılarak hesaplanan çevrimsel farklar analiz edildiğinde karışımdaki bütanol oranının artmasının çevrimsel farkları arttırıcı yönde etki yaptığı görülmüştür. Ayrıca genel olarak bakıldığında motor devir sayısı arttıkça çevrimsel farklar azalmıştır. Son olarak oluşturulan YSA modellerinin deneysel sonuçlar ile oldukça uyumlu olduğu ve çevrimsel farkları tahmin etmekte iyi bir model olduğu belirtilmiştir.

Literatür özetinden de görüldüğü gibi dizel motorlarda çevrimsel farklar ile ilgili çalışmalar sınırlı olup özellikle bütanol-dizel yakıtı kullanılan çalışmalar oldukça azdır. Genellikle bütanol-dizel yakıt kullanılan çalışmalarda ise tek bir basınç parametresi kullanılmış, farklı göstergelerle karşılaştırmalar yapılmamıştır. Bu çalışmada ise dizel motorlarda bütanol-dizel yakıt karışımı kullanılmasının çevrimsel farklara etkisi hem ortalama indike basınç hem de maksimum silindir basınç değeri cinsinden hesaplanarak karşılaştırılmalar yapılmıştır. Dolayısıyla bu iki farklı basınç parametresinin benzer sonuçlar verip vermediği belirlenmiştir. Deneysel çalışmalar 2200 dev/dak sabit hızında ve 3 farklı karışım durumu için 100 ardışık çevrim analiz edilerek gerçekleştirilmiştir.

## 2. Çevrimsel Farklar

İçten yanmalı motorların çalışması esnasında herhangi bir çevrim diğer bir çevrimden farklı bir yol izlemektedir. İndikatör diyagramları yardımıyla izlenen bu olay çevrimsel farklar veya çevrimden çevrime farklar olarak bilinmektedir. Çevrimsel farkların gözlenmesi için genellikle basınç ve yanma ile ilgili parametreler kullanılmaktadır. Literatürde basınç ile ilgili en çok kullanılan parametreler; maksimum silindir basıncı, maksimum silindir basıncının meydana geldiği krank açısı, maksimum basınç artış hızı, maksimum basınç artış hızının meydana geldiği krank açısı ve ortalama indike efektif basınçtır. Yanma ile ilgili olan parametreler ise maksimum ısı salınım oranı ve maksimum kütleli yanma oranıdır. Çevrimsel farkların hesaplanmasında en pratik yöntem olarak basınç veya yanma parametrelerinin değişim katsayısı (COV) kullanılmaktadır (Yang vd., 2013, 1-14). Bu çalışmada hem maksimum silindir basıncı hem de ortalama indike basınç değerleri kullanılarak Denklem 1'de gösterildiği değişim katsayısı hesaplanmıştır.

$$COV_P = \frac{\sigma_P}{\bar{P}} \times 100 \quad (2.1)$$

Burada  $\sigma_P$  ve  $\bar{P}$  sırasıyla standart sapma ve ortalama değer olup aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

$$\sigma_P = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\bar{P} - P(i))^2}{n-1}} \quad (2.2)$$

$$\bar{P} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P(i) \quad (2.3)$$

Burada  $n$  çevrim sayısıdır. Çalışmada hem maksimum silindir basıncı hem de ortalama indike basınç değerleri kullanılarak iki farklı COV değeri hesaplanacağı için  $P$  değeri ilgili parametreye göre değişecektir.

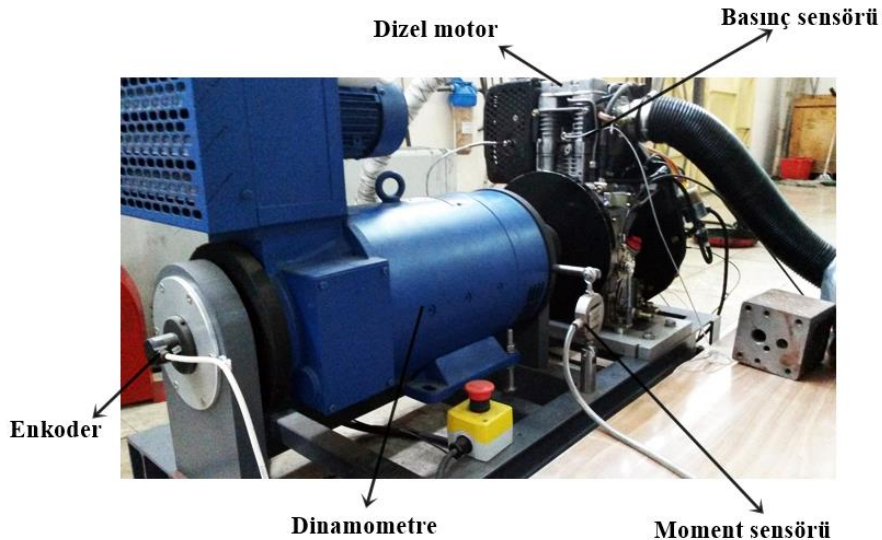
Çevrimsel farkların sebepleri üç ana başlık altında toplanabilir. Bunlardan ilki silindir içindeki türbülans ve girdaptan dolayı oluşan gaz hareketleridir. İkinci sebebi ise yakıt, hava ve artık gaz miktarındaki değişimlerdir. Bu parametreler silindir içinde çevrimden çevrime sürekli olarak değişim gösterir. Karışımda meydana gelen bu değişimler doğal olarak çevrimsel farka sebep olmaktadır. Çevrimsel farklara sebep olan son etmen ise karışımın hazırlanmasıdır. Karışım hazırlanmasındaki farklılıklar ise püskürtme basıncı, püskürtme sırasında silindir içi şartlar ve püskürtme zamanlamasındaki farklılıklardan kaynaklanır (Bittle vd., 2010, 1-17).

Çevrimsel farkların düşürülmesinin daha kararlı bir yanma, daha az tekleme sorunu ve otomotiv uygulamalarında yüksek sürüş konforu gibi birçok faydası bulunmaktadır. Ortalama indike efektif basınç cinsinden değişim katsayısı ( $COV_{imep}$ ), %10 değeri, kritik sınır değeri olarak edilmiştir. Bu yüzden çevrimsel farkların azaltılmasında yanma süreci için kontrol stratejilerinin geliştirilmesi ve kullanılması büyük önem arz etmektedir. Ayrıca çevrimsel farkların azaltılması yakıt ekonomisi, egzoz emisyonları ve gürültü emisyonları açısından da iyileştirici sonuçlar doğurmaktadır (Heywood, 1988; Yang vd., 2013, 1-14). Dizel yakıtına uygun olarak geliştirilen mevcut motorlarda alternatif yakıt kullanılması durumunda çevrimsel farkların azaltılması için uygun enjektör kullanılması ve püskürtme zamanlaması, püskürtme basıncı gibi parametrelerin optimize edilmesi gerekmektedir. Böylece çevrimsel farklar minimize edilerek özellikle yakıt ekonomisi ve egzoz emisyonlarında olumlu sonuçlar elde edilecektir.

### 3. Deneysel Çalışma

Deneysel çalışmalar Karadeniz Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü İçten Yanmalı Motorlar Laboratuvarında yapılmıştır. Motor deneyleri Şekil 1'de gösterilen dört zamanlı, hava soğutmalı ve tek silindirli bir dizel motorunda gerçekleştirilmiş olup bu motora ait teknik özellikler Tablo 1'de verilmiştir.

Şekil 1. Deney motoru ve dinamometrenin genel görünümü



**Tablo 1.** Dency motorunun teknik özellikleri

<b>Mutlak maksimum güç</b>	7,3 kW (9,9 hp); 3600dev/dak
<b>Sürekli nominal güç</b>	6,5 kW (8,8 hp); 3600 dev/dak
<b>Silindir çapı</b>	88 mm
<b>Strok uzunluğu</b>	76 mm
<b>Krank yarıçapı</b>	38 mm
<b>Biyel kolu uzunluğu</b>	124 mm
<b>Motor hacmi</b>	462 cm <sup>3</sup> (0.462 L)
<b>Sıkıştırma oranı</b>	20,5:1

Çevrimsel farkın hesaplanabilmesi için gerekli olan basınç değerleri ECA 100 Çevrim Analizörü ve buna bağlı ECA 101 Basınç Transdüseri ile ECA 102 Şaft Enkoderi tarafından ölçülmüştür. Ayrıca ECA 100 yazılımı ile P-V ve P-θ diyagramları detaylı olarak görülebilmektedir. Çalışmada dizel yakıtına katkı olarak bütanol kullanılmış olup kapalı formülü C<sub>4</sub>H<sub>9</sub>OH şeklinde ifade edilmektedir. Bütanolün; n-bütanol, 2-bütanol, iso-bütanol ve t-bütanol olmak üzere dört izomeri vardır. Bu dört izomerin de kimyasal formülleri ve ısıl değerleri aynı olmasına karşın moleküler yapıları farklıdır. Bütanol; yosun, mısır ve selüloz içeren diğer bitkisel ürünlerin fermantasyonu sonucu üretilebilir. Dolayısıyla yenilenebilir bir yakıt olarak düşünülebilmektedir. Bu çalışmada kullanılan dizel yakıtı ve bütanolün bazı özellikleri Tablo 2'de verilmiştir.

**Tablo 2.** Dizel yakıtı ve n-butanol'ün yakıt özellikleri

	<b>Dizel yakıtı</b>	<b>Butanol</b>
<b>Kimyasal formül</b>	C <sub>14</sub> H <sub>24</sub>	C <sub>4</sub> H <sub>9</sub> OH
<b>Molekül ağırlığı [kg/kmol]</b>	192,346 <sup>c</sup>	74,123 <sup>c</sup>
<b>Yoğunluk [kg/m<sup>3</sup>]</b>	834,5 <sup>a</sup>	813,6 <sup>a</sup>
<b>Alt ısıl değer [kJ/kg]</b>	42600 <sup>b</sup>	33600 <sup>b</sup>
<b>Setan sayısı</b>	59,8 <sup>a</sup>	8,7 <sup>a</sup>
<b>Kinematik viskozite, 40 °C, [mm<sup>2</sup>/s]</b>	2,938 <sup>a</sup>	2,268 <sup>a</sup>
<b>Parlama noktası [°C]</b>	60,5 <sup>a</sup>	37,5 <sup>a</sup>

<sup>a</sup> laboratuvarında ölçülmüştür, <sup>b</sup> Mendeleyev formülü ile hesaplanmıştır, <sup>c</sup> kimyasal formülden hesaplanmıştır.

Yakıt ile ilgili ölçümler KTÜ Prof. Dr. Saadetin Güner Yakıt Uygulama ve Araştırma Merkezinde yapılmış olup ölçümler Viskozite için TS 1451 EN ISO3104, parlama noktası için TS EN ISO 2719 ve setan sayısı için TS EN 15195 standardına göre gerçekleştirilmiştir. Motor deneyleri tam gaz konumunda ve 2200 dev/dak motor devrinde yapılmış olup bu devir sayısı yaklaşık olarak maksimum momentin elde edildiği değerdir. Saf dizel yakıtının yanı sıra dizel yakıtına hacimsel olarak %3 (B3), %9 (B9) ve %15 (B15) oranında n-bütanol eklenerek toplamda 4 farklı yakıt hazırlanmıştır. Çevrimsel farkın hesaplanması için ardışık 100 çevrim kaydedilmiş ve gerekli analizler yapılmıştır. Deneysel çalışmada ölçümler alınmadan önce 15 dakika beklenip motorun kararlı hale gelmesi sağlanmıştır. Elde edilen sonuçların güvenilirliği artırmak için tüm ölçümler belirli aralıklarla 5 kez tekrarlanmıştır. Deneysel çalışmalarda devir sayısı ±1 rpm, moment ±0.1 Nm, sıcaklık ±0.1 °C ve basınç ±1 mbar hassasiyetle ölçülmüştür.

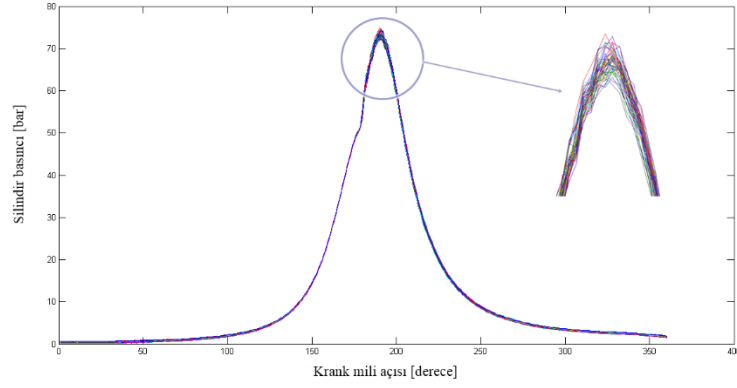
#### 4. Bulgular ve Tartışma

Çalışma kapsamında dizel yakıtına değişik oranlarda bütanol eklenmesinin çevrimsel farklılıklara etkisi hem maksimum basınç hem de ortalama indike basınç değerleri analiz edilerek incelenmiştir. İlk olarak saf dizel yakıtına ait analizler gerçekleştirilmiştir. Şekil 2'de saf dizel yakıt durumunda elde edilen indikatör diyagramları, maksimum basınç (P<sub>max</sub>) değişimi ve ortalama indike basınç (P<sub>mi</sub>)değişimi görülmektedir.

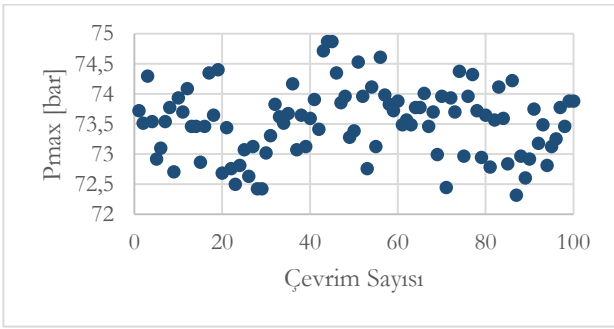
Saf dizel yakıtı durumu için maksimum basınç değeri 72,31 ile 74,86 bar değerleri arasında salınım yaparken ortalama indike basınç değeri 7,16 ile 7,58 bar değeri arasında salınım yapmaktadır. Şekil 3'te B3 karışım yakıtına ait değişimler gösterilmiştir. B3 karışım yakıt için maksimum basınç değeri 71,79 ile 74,42 bar değerleri arasında salınım yaparken ortalama indike basınç değeri 6,93 ile 7,35 bar değeri arasında salınım yapmaktadır. B9 karışım yakıtına ait indikatör diyagramı ve basınç değişimleri ise Şekil 4'te verilmiştir. B9 karışım yakıt için maksimum basınç değeri 72,31 ile 75,85 bar değerleri arasında salınım yaparken ortalama indike basınç değeri 6,92 ile 7,39 bar değeri arasında salınım yapmaktadır. Son olarak B15 karışım yakıtı için elde edilen sonuçlar Şekil 5'te sunulmuştur. B15 karışım yakıt için maksimum basınç değeri 70,23 ile 73,12 bar değerleri arasında salınım yaparken ortalama indike basınç değeri 6,41 ile 6,84 bar değeri arasında salınım yapmaktadır. Genel olarak bakıldığında yakıttaki bütanol oranı arttıkça maksimum basınç değeri düşmekle beraber B9 karışım yakıtı için biraz artış görülmektedir. Ortalama

indike basınç değerleri analiz edildiğinde ise karışımındaki bütanol oranı arttıkça ortalama indike basınç değerinin azaldığı görülmüştür.

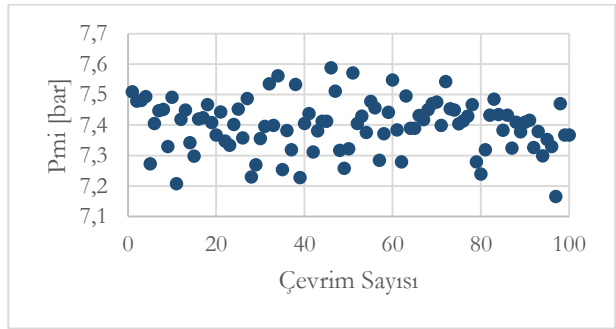
**Şekil 2.** (a) Saf dizel yakıtına ait indikatör diyagramı, (b)  $P_{max}$  değişimi ve (c)  $P_{mi}$  değişimi



(a)

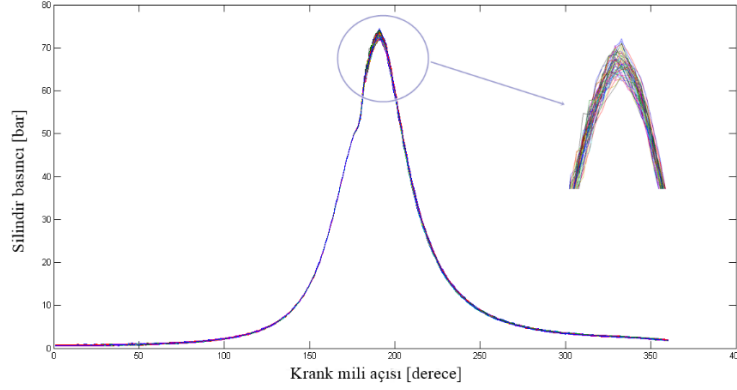


(b)

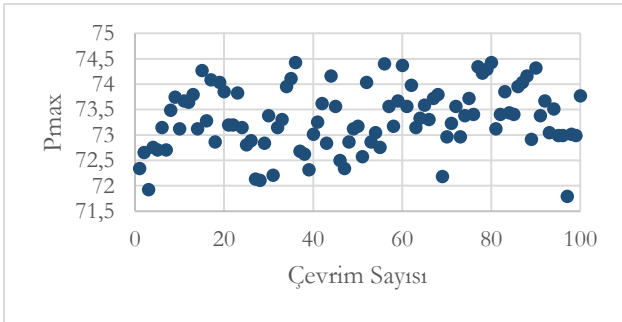


(c)

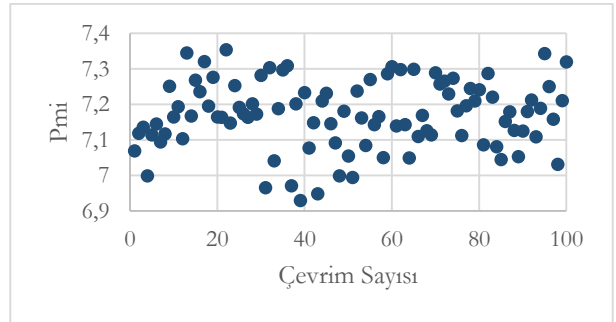
**Şekil 3.** (a) B3 yakıtına ait indikatör diyagramı, (b)  $P_{max}$  değişimi ve (c)  $P_{mi}$  değişimi



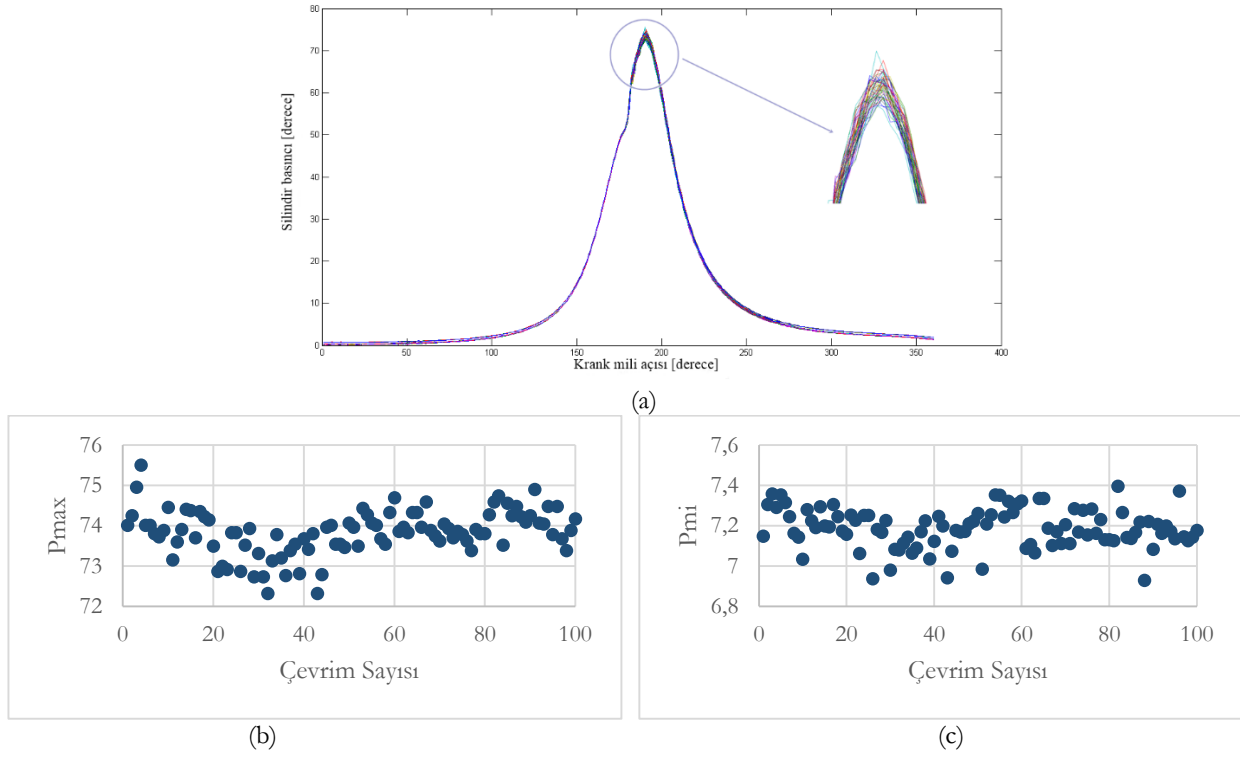
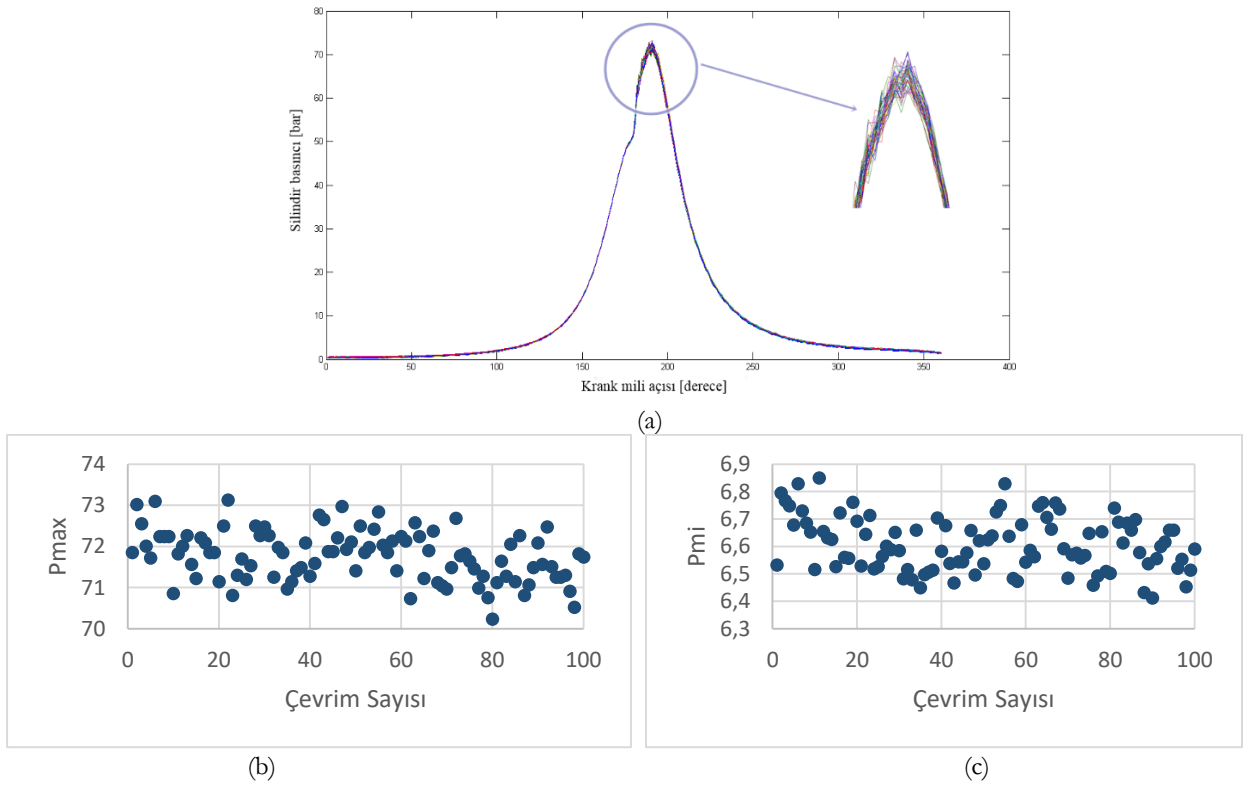
(a)



(b)

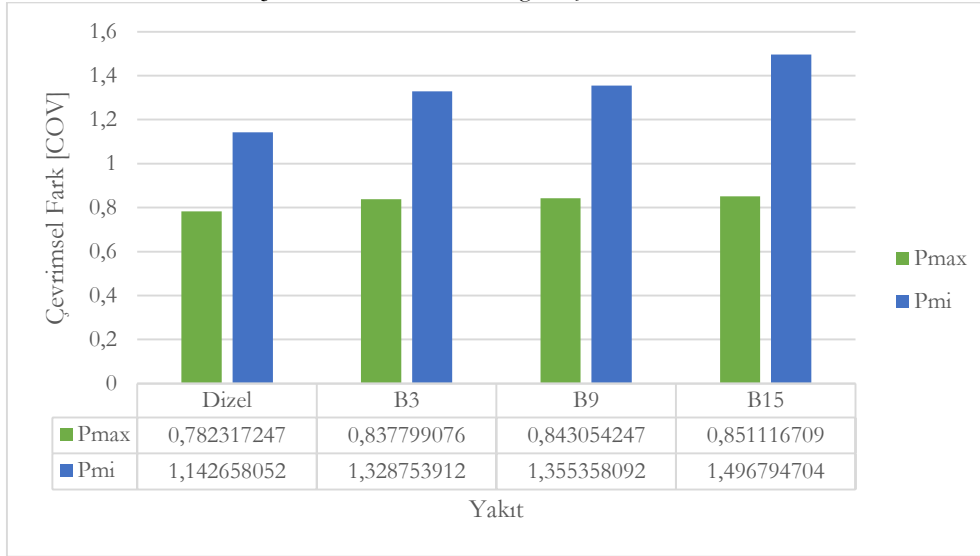


(c)

Şekil 4. (a) B9 yakıtına ait indikatör diyagramı, (b)  $P_{max}$  değişimi ve (c)  $P_{mi}$  değişimiŞekil 5. (a) B15 yakıtına ait indikatör diyagramı, (b)  $P_{max}$  değişimi ve (c)  $P_{mi}$  değişimi

Elde edilen veriler kullanılarak 4 farklı yakıt durumu için hem maksimum basınç hem de ortalama indike basınç cinsinden varyans değerleri hesaplanarak çevrimsel farklar incelenmiştir. Hesaplanan çevrimsel farklar, Şekil 6'da ayrıntılı olarak verilmiştir.

Şekil 6. Yakıt durumuna göre çevrimsel farklar



Buna göre karışımdaki bütanol oranı arttıkça çevrimsel farklar da artma eğilimine girmiştir. Saf dizel yakıtı için  $P_{max}$  kullanılarak elde edilen varyans değeri % 0,78 olarak hesaplanmıştır. Dizel yakıtına bütanol eklenmesi ile varyans değeri artarak B15 için % 0,85 olarak hesaplanmıştır. Benzer sonuçlar  $P_{mi}$  kullanılarak hesaplanan değerler için de geçerlidir. Saf dizel yakıtı için  $P_{mi}$  parametresi yardımıyla hesaplanan varyans değeri %1,14 iken B15 karışımı için bu değer %1,49'a yükselmiştir. Bu sonuçlara göre hem  $P_{max}$  hem de  $P_{mi}$  parametreleri kullanılarak hesaplanan çevrimsel farkların birbirine paralel olduğu ve dizel yakıtında bütanol kullanımının çevrimsel farklılığı artırdığı görülmüştür. Bununla beraber artış miktarının  $P_{mi}$  değişiminde daha net olduğu belirlenmiştir. Daha önce değinildiği gibi çevrimsel farkların artması yakıt ekonomisini, egzoz ve gürültü emisyonlarını olumsuz yönde etkilemektedir. Dizel yakıtına bütanol eklendiğinde setan sayısı düşmekte ve tutuşma gecikmesi artmaktadır. Ayrıca motordaki mevcut enjektör ve püskürtme parametreleri dizel yakıt için ayarlanmıştır. Dolayısıyla dizel yakıtına bütanol eklenmesinin çevrimsel farklılıkları artırmasında yukarıda bahsedilen olayların sebep olduğu düşünülmektedir. Ayrıca çevrimsel farkların azaltılması için karışım yakıtına uygun enjektör tasarımı yapılması gerekli olduğu düşünülmektedir. Bununla beraber, püskürtme basıncı, püskürtme zamanlaması gibi önemli parametrelerin optimize edilmesi gerekmektedir. Dolayısıyla dizel motorlarda bütanol-dizel yakıt karışımı kullanılması durumunda ek önlemlerin alınmasının faydalı olacağı düşünülmektedir.

## 5. Sonuçlar

Bu çalışmada sıkıştırma ateşlemeli motorlarda dizel yakıtına bütanol eklenmesinin çevrimsel farklara etkisi araştırılmıştır. Deneyler tam gaz konumunda sabit 2200 dev/dak durumunda gerçekleştirilmiş, saf dizel yakıtı ve B3, B9 ve B15 olmak üzere üç farklı karışım yakıtı ile çalışma durumu incelenmiştir. Çalışma kapsamında çevrimsel farkların hesaplanması için maksimum silindir basıncı ve ortalama indike basınç değerleri kullanılmış olup bu iki parametrenin birbiri ile tutarlı sonuçlar verip vermediği de araştırılmıştır. Çalışmadan elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenebilmektedir;

- Dizel yakıtına bütanol eklenmesi ile motorda meydana gelen çevrimsel farklar artmaktadır.
- Çevrimsel farklardaki değişim hem maksimum silindir basıncı hem de ortalama indike basınç değerleri kullanılarak hesaplanmış ve sonuçlar birbirine paralel çıkmıştır.
- Saf dizel yakıtı için  $COV_{P_{max}}$  değeri % 0,78 olarak hesaplanmış bu değer B15 yakıtı için % 0,85 olarak hesaplanmıştır.
- $COV_{P_{mi}}$  değeri saf dizel yakıtı için % 1,14 olarak hesaplanırken B15 yakıtı için bu değer % 1,49'a yükselmiştir.



## Teşekkür

Bu çalışma, Karadeniz Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından desteklenmiştir (Proje Numarası: FYL-2015-5286).

## Kaynakça

- Bekal, S., ve Babu, T. A. (2011). An Analysis of Cycle-by-cycle Fluctuation in Combustion Parameter in CI Engine Operation for Various Bio-fuels. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 33(19), 1792-1801. <https://doi.org/10.1080/15567030903419422>.
- Bittle, J., Knight, B., & Jacobs, T. (2010). Biodiesel effects on cycle-to-cycle variability of combustion characteristics in a common-rail medium-duty diesel engine. *SAE*, (2010-01-0867). <https://doi.org/10.4271/2010-01-0867>
- Ceviz, M., Koncuk, F., Küçük, Ö., Gören, A., and Yüksel, F. (2011). Analysis of Combustion Stability and Its Relation to Performance Characteristics in a Compression Ignition Engine Fueled with Diesel-biodiesel Blends. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 33(10), 990-1003. <https://doi.org/10.1080/15567030903261790>.
- Gürgen, S., Ünver, B., and Altın, İ. (2017). Experimental investigation on cyclic variability, engine performance, and exhaust emissions in a diesel engine using alcohol-diesel fuel blends. *Thermal Science*, 21(1), 581-589. <https://doi.org/10.2298/TSCI161020306G>.
- Gürgen, S., Ünver, B., & Altın, İ. (2018). Prediction of cyclic variability in a diesel engine fueled with n-butanol and diesel fuel blends using artificial neural network. *Renewable Energy*, 117, 538-544. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.10.101>.
- Heywood, J. B. (1988). *Internal combustion engine fundamentals (Vol. 930)*. McGraw-hill, New York.
- Mei, D., Wu, H., Ren, H., Hielscher, K., and Baar, R. (2014). Combustion Cycle-by-Cycle Variations in a Common Rail Direct Injection Engine Fueled with Dimethyl Carbonate–Diesel Blend. *Journal of Energy Engineering*, 04014059.
- Rakopoulos, C. D., Rakopoulos, D. C., Kosmadakis, G. M., and Papagiannakis, R. G. (2019). Experimental comparative assessment of butanol or ethanol diesel-fuel extenders impact on combustion features, cyclic irregularity, and regulated emissions balance in heavy-duty diesel engine. *Energy*, 174, 1145-1157. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.03.063>.
- Rakopoulos, D., Rakopoulos, C., Giakoumis, E., Papagiannakis, R. and Kyritsis, D. (2008). Experimental-stochastic investigation of the combustion cyclic variability in HSDI diesel engine using ethanol–diesel fuel blends. *Fuel*, 87(8), 1478-1491. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2007.08.012>.
- Rakopoulos, D., Rakopoulos, C., Hountalas, D., Kakaras, E., Giakoumis, E. and Papagiannakis, R. (2010). Investigation of the performance and emissions of bus engine operating on butanol/diesel fuel blends. *Fuel*, 89(10), 2781-2790. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2010.03.047>.
- Rakopoulos, D., Rakopoulos, C., Papagiannakis, R. and Kyritsis, D. (2011). Combustion heat release analysis of ethanol or n-butanol diesel fuel blends in heavy-duty DI diesel engine. *Fuel*, 90(5), 1855-1867. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2010.12.003>.
- Rakopoulos, D. C., Rakopoulos, C. D., Giakoumis, E. G., Dimaratos, A. M. and Kyritsis, D. C. (2010). Effects of butanol–diesel fuel blends on the performance and emissions of a high-speed DI diesel engine. *Energy Conversion and Management*, 51(10), 1989-1997. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2010.02.032>.
- Selim, M. Y. (2005). Effect of engine parameters and gaseous fuel type on the cyclic variability of dual fuel engines. *Fuel*, 84(7), 961-971. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2004.11.023>.
- Şahin, Z. and Aksu, O. N. (2015). Experimental investigation of the effects of using low ratio n-butanol/diesel fuel blends on engine performance and exhaust emissions in a turbocharged DI diesel engine. *Renewable Energy*, 77, 279-290. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.11.093>.
- Tang, D., Ge, J., Duan, R. and Zhang, Y. (2011). Investigation on the combustion cyclic variability in a non-road diesel engine fuelled with diesel/bio-diesel blends. Paper presented at *the Electric Information and Control Engineering (ICEICE), 2011 International Conference on*.
- Yang, Z., Steffen, T. and Stobart, R. (2013). Disturbance sources in the diesel engine combustion process. *SAE*, (0148-7191). <https://doi.org/10.4271/2013-01-0318>.