Etanol-Dizel Karışımıyla Çalışan Sıkıştırma ile Ateşlemeli bir Motorun Çalışma Parametrelerinin Taguchi Yöntemi ile Optimizasyonu

Uğur Özel[1,3], Elif Balta[2], Ahmet Necati Özsezen[1,3]

[1] *Otomotiv Mühendisliği Bölümü, Teknoloji Fakültesi, Kocaeli Üniversitesi, İzmit-Kocaeli, 41001, Türkiye*
[2]*İstanbul Nişantaşı Üniversitesi, Meslek Yüksekokulu, Otomotiv Teknolojisi Programı, Şişli-İstanbul, 34375, Türkiye*
[3]*AYARGEM, Kocaeli Üniversitesi, İzmit-Kocaeli, 41001, Türkiye*

Özet

Bu çalışma, dizel motorda maksimum motor performansı ve minimum egzoz emisyon seviyelerini sağlamak için optimum etanol-dizel karışım oranını, emme havası basıncını ve çevrim süresini belirlemeyi amaçlamaktadır. İstatistiksel analizler, Taguchi'nin L_{32} ortogonal dizisi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Kontrol parametrelerinin seviyelerinin deneysel değişkenler üzerindeki etkisini araştırmak için varyans analizi (ANOVA) tekniği kullanılmıştır. Çevrim süresinin silindir içi gaz basıncı üzerinde baskın bir etkiye sahip olduğu gözlemlenmiştir. Amonyak dışındaki egzoz emisyonları seviyelerinde karışım türüne ve emme havası basıncının artmasına bağlı iyileşmeler gözlemlenmiştir. Tüm ANOVA analizlerinde bütün değişkenler için R^2 değeri 90% ve üzerindeyken en düşük seviyedeki uyum iyiliği indeksi, NH_3 emisyonu için hesaplanmıştır. Karışımdaki etanol miktarının CO, CH_4, ve NH_3 emisyonlarını önemli ölçüde etkilediği belirlenmiştir. Öte yandan çevrim süresinin NO_x emisyonunu, emme havası basıncının ise CO_2 emisyonunu önemli ölçüde etkilediği belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Alkol yakıtlar, Aşırı doldurma, Dizel motorlar, Taguchi tasarımı, ANOVA.

Optimisation of Operating Parameters of a Compression Ignition Engine Fueled by Ethanol-Diesel Blend Using the Taguchi Method

Abstract

This study aims to determine the optimum ethanol-diesel blend ratio, intake air pressure, and cycle time to achieve maximum engine performance and minimum exhaust emission levels in a diesel engine. Statistical analyses were performed using Taguchi's L_{32} orthogonal array. The analysis of variance (ANOVA) technique was used to investigate the effect of control parameter levels on experimental variables. It was observed that the cycle time had a dominant effect on the cylinder gas pressure. Improvements in exhaust emission levels, except for ammonia, were observed depending on the mixture type and the increase in intake air pressure. While the R^2 value was 90% and above for all variables in all ANOVA analyses, the goodness-of-fit index was calculated for the lowest level of NH_3 emissions. It was determined that the amount of ethanol in the mixture significantly affects CO, CH_4, and NH_3 emissions. On the other side, it was determined that the cycle time significantly affects NOx emissions, while the intake air pressure significantly affects CO_2 emissions.

Keywords: Alcohol fuels, Supercharge, Diesel engines, Taguchi design, ANOVA.

1. Giriş (Introduction)

Mevcut enerji tedarik sorunları, içten yanmalı motorlar için alternatif yakıtların önemini ortaya koymaktadır. Ayrıca, emisyon sınırlamalarının artması, içten yanmalı motorlarla çalışan araçlarda yüksek oksijen içeriğine sahip yakıtların kullanılmasını zorunlu kılmaktadır. Avrupa Birliği, içten yanmalı motorlar için 2030 yılına kadar iklim ve enerji politikaları çerçevesi içinde önemli hedefler belirlemiştir [1]. 2030 yılında, sera gazı emisyonlarının 1990 yılı değerlerinden en az %40 daha düşük olması beklenmektedir [2]. Sera gazlarını azaltmaya yönelik bir strateji geliştirmek için uzun vadeli planlama konusunda, bazı başkent belediyeleri 2030 yılına kadar sokaklarda tüm içten yanmalı motorlu araçları yasaklamayı planlamıştır.

Günümüzde hidrojen, doğal gaz, sentetik gazlar ve biyoyakıtlar ana sürdürülebilir yakıtlar olarak tanımlanmaktadır ve bunların arasında biyoyakıtlar en çevre dostu yakıt olarak gösterilmektedir [3]. Biyoyakıtların (etanol, biyodizel

vb.) kullanılması sayesinde egzoz hatlarında toplam yanmamış hidrokarbon, karbon monoksit ve partikül madde emisyonlarında, saf dizel yakıt kullanımına kıyasla önemli azalmalar meydana gelebilmektedir. Biyoyakıtların kullanılması silindir içinde yanma verimini arttırabildiği için egzoz hatlarında saf dizel yakıt kullanımına kıyasla daha fazla CO_2 ve NO_x emisyonu oluşumuna yol açabilmektedir [4,5]. Bu nedenle, biyoyakıt çalışmalarında optimum çalışma bölgelerinin belirlenmesi gerekmektedir.

İçten yanmalı motorların optimum çalışma aralıklarını belirlemek için bir dizi motor testleri yapılmalıdır. Uzun süren ve maliyetli olan bu motor testlerini daha az sayıda yaparak doğru sonuçlara ulaşabilmek için çeşitli istatistiksel yöntemler kullanılmaktadır. Bu yöntemlerden birisi olan Taguchi yöntemi, dizel motorların tasarım, performans ve emisyon parametrelerini optimize etmek için birçok araştırmacı tarafından tercih edilmiştir [6-12].

Taguchi ortogonal dizisi, en iyi yanma karakteristikleri ve egzoz emisyon değerlerini sağlamak için kontrol faktörlerinin etkilerinin optimal kombinasyonunu belirleme bakımından değerli bir yöntemdir. Dizel motorların yanma parametrelerinin iyileştirilmesine yönelik geçmişten günümüze yapılan optimizasyon çalışmalarında, araştırmacılar Taguchi yönteminin çok başarılı olduğunu ifade etmişlerdir [13–22].

Bu çalışmada, kontrol parametrelerinin (çevrim süresi, emme havası basıncı ve yakıt türü) optimal kombinasyonunu belirlemek için Taguchi yönteminin L_{32} ortogonal dizisi kullanılmıştır. Daha sonra, kontrol parametrelerinin etki düzeylerini bulmak için varyans analizi (ANOVA) uygulanmıştır. Bu çalışma, etanol-dizel karışımları ile çalışan bir dizel motorda egzoz emisyonlarını en aza indirmek için parametrelerin optimum kontrol düzeylerini belirlemeyi amaçlamaktadır.

2. Ana Bölüm (Main Section)

2.1 Materyal ve Metot

2.1.1 Test Yakıtı

Dizel motor testlerinde, EN 590 standardına uygun referans dizel yakıt (D100) ana yakıt olarak kullanılmıştır. Alternatif yakıt olarak %95 ve üzeri saflıkta etanol (EC Numarası: 200-578-6) ve 2-bütanol (EC Numarası: 201-158-5) kullanılmıştır. Bilindiği gibi, etanol-dizel karışımlarında en kritik sorun faz ayrışmasıdır. Karışım hazırlanırken, faz ayrışmasını önlemek için karışımdaki etanol oranının %20'si kadar 2-bütanol eklenmiştir. Etanol(E)-dizel(D) karışımına 2-bütanol (B) eklenerek yaklaşık üç hafta boyunca faz ayrışması olmadığı tespit edilmiştir. Bu çalışmada karışım, etanolün hacimsel yüzdesine göre isimlendirilmiştir. Yakıt karışımlarının özellikleri Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Yakıt karışımlarının özellikleri

Yakıt Özellikleri	**E5** ($C_{11.42}H_{22.96}O_{0.06}$)	**E10** ($C_{10.84}H_{21.92}O_{0.12}$)	**E15** ($C_{10.26}H_{20.88}O_{0.18}$)	**E20** ($C_{9.68}H_{19.84}O_{0.24}$)
Yakıt karışımı (% hacimsel)	5E + 1B + 94D	10E + 2B + 88D	15E + 3B + 82D	20E + 4B + 76D
Moleküler Ağırlık (g/mol)	161.3	154.2	147.2	140.1
Yoğunluk (kg/m^3, 15^{o}C)	832	829	827	824
Kinematik Viskozite (mm^2/s, 40^{o}C)	2.46	2.41	2.37	2.33
Alt Isıl Değer (MJ/kg)	41.77	40.83	40.08	39.23
Karbon (% kütlesel)	85.05	84.43	83.74	82.99
Hidrojen (% kütlesel)	14.35	14.33	14.30	14.27
Oksijen (% kütlesel)	0.60	1.24	1.96	2.74

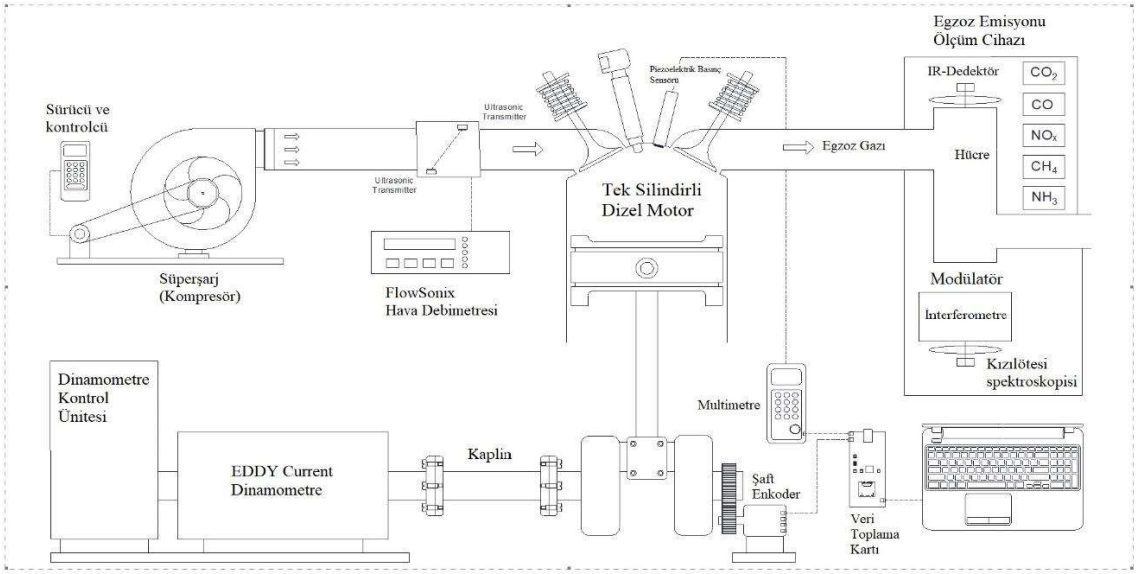
2.1.2. Deney Düzeneği

Bu çalışmada, motor testleri 85 ms (yaklaşık 1400 d/d) ve 75 ms (yaklaşık 1600 d/d) sabit çevrim sürelerinde ve %50 gaz pedalı açıklığı konumunda (%50 motor yükünde) gerçekleştirilmiştir. Deneylerde common rail yakıt enjeksiyon sistemine sahip Jhon Deere marka tek silindirli bir dizel motor kullanılmıştır. Common rail sisteminin elektronik dizel kontrol ünitesi kullanılarak her çevrimde 45 mg sabit miktarda yakıt enjekte edilmiştir. Test motorunun genel özellikleri Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. Test motorunun özellikleri

Motor tipi	Tek Silindirli – 4 zamanlı	**Max. Motor Hızı**	2500 d/d
Yakıt sistemi	Direkt enjeksiyonlı ortak yakıt hattı – 1800 bar (Common Rail Direct Injection) – 1800 bar	**Max. Güç**	50 kW
		Max. Tork	160 Nm
Silindir Hacmi	1205 cm3	**Silindir Çapı**	106.5 mm
Subaplar	3 (2 emme – 1 egzoz) – (OHV)	**Kurs Boyu**	127 mm
Max. Silindir Basıncı	190 bar	**Sıkıştırma Oranı**	16.14

Motor testlerinde, performans parametreleri ISO 14396 standardına göre belirlenmiştir. Test motoru kararlı çalışma koşullarına ulaştığında veri toplanmaya başlanmıştır. Motorun kararlılık şartları için, karterdeki yağlama yağı sıcaklığı 90 °C, radyatördeki soğutma suyu sıcaklığı 70 °C ve yakıt deposundaki yakıt sıcaklığı 20 °C değerleri belirlenmiştir. Silindir gaz basıncını ölçmek için AVL-GU22C marka basınç sensörü kullanılmıştır. Yanma sonucu silindir içi basınç değerleri, 50 ardışık çevrimden toplanan verilerin ortalaması alınarak oluşturulmuştur. Krank açısına bağlı silindir gaz basıncı ve anlık hacim değişimi 0,1° krank mili açısı (KMA) hassasiyet ile ölçülmüştür. Motor emme manifoldundaki aşırı doldurma basıncını oluşturmak ve kontrol etmek için AAVL 515X smart plenum marka süperşarj sistemi kullanılmıştır. Süperşarj sisteminin hava şartlandırıcısı kullanılarak tüm test koşularında 25 °C sabit sıcaklıktaki emme havası silindire iletilmiştir. Ayrıca bu sistem, emme manifoldunda laminer hava akışını sağlamıştır. Emme havası basıncı, gösterge basıncı cinsinden atmosferik basıncının %10, %20 ve %30 oranlarında artırılarak mutlak basınç cinsinden 125,3 kPa, 127,7 kPa, 130,1 kPa ve 132,5 kPa değerlerinde uygulanmıştır. Motor test sisteminin şematik görünümü Şekil 1'de gösterilmektedir.



Şekil 14. Motor test sistemi

2.1.3. Metot

Taguchi yöntemi

Taguchi; üretim değişkenliği, tüketici kullanımı ve çevre koşulları gibi faktörleri göz önünde bulundurarak üretim ve kullanımda istikrar ve güvenilirliğe odaklanmıştır. Bu faktörler gürültü faktörleri (veya hata faktörleri) olarak adlandırılmaktadır [23]. Gürültü faktörleri ürün özelliklerinin değerlerini belirlerken, seçilebilen ve düzeltilebilen faktörlere kontrol faktörleri denilmektedir. Değişkenlikten kaynaklanan kaybı ifade eden hedef değere göre ortalama karesel hata (σ^2 varyansı) denklem 1'de gösterildiği gibi hesaplanır.

$$\sigma^2 = 1/32\ (y_1^2 + y_2^2 + \cdots + y_{32}^2) \quad (1)$$

Taguchi yöntemi, Taguchi tarafından süreç iyileştirme ve optimizasyonu için geliştirilen istatistiksel bir yöntemdir

[24]. Deneysel verileri değerlendirmek için ortogonal diziler kullanan Taguchi, istatistiksel tasarımı etkileyen parametreleri belirlemiştir. Taguchi, bir çıktı karakteristiğinin performansının kararlılığının değerlendirmesi olan sinyal-gürültü (S/N) oranını tanımlamıştır. Denklem 2'de görüldüğü gibi, S/N oranı, duyarlılığın değişkenliğe oranını temsil eder ve S/N birimi dB'dir.

S/N oranı= Sinyal gücü / Gürültü gücü (2)

S/N oranı, kontrol faktörlerinin etkisini analiz etmek için kullanılır. Bu çalışmada, maksimum dizel yanma değerlerini elde etmek için SN oranını hesaplamak üzere "Daha büyük, daha iyi" yaklaşımı kullanılmıştır. Sıfır egzoz emisyon noktasına en yakın noktayı elde etmek için ise SN oranının hesaplanmasında "Daha küçük, daha iyi" yaklaşımı kullanılmıştır. SN oranı hesaplanırken kullanılan formüller denklem 3'te ve denklem 4'te verilmiştir.

"Daha büyük, daha iyi": $S/N = -10 \log [(1/32)(1/(y_1^2) + 1/(y_2^2) + \cdots + 1/(y_{32}^2))]$ (3)

"Daha küçük, daha iyi" : $S/N = -10 \log [(1/32)(y_1^2 + y_2^2 + \cdots + y_{32}^2)]$ (4)

Taguchi yöntemi ile deney tasarımı

Deney tasarımı (DOE) yöntemi, dizel motordan elde edilen verilere göre tasarlanmıştır. En iyi yanma ve en düşük emisyon değerlerine ulaşmak için çevrim süresi, karışımdaki etanol yüzdesi ve emme hava basıncı ana faktörler olarak kabul edilmiştir. Tablo 3, bu çalışma için seçilen kontrol faktörlerini ve seviyelerini göstermektedir. Çevrim süresi için kademe, yakıt türü ve emme hava basıncı için ise dört seviye seçilmiştir.

Tablo 3. Kontrol faktörleri kademeleri

	Kontrol Faktörleri	**Seviye 1**	**Seviye 2**	**Seviye 3**	**Seviye 4**
A	Çevrim süresi(ms)	85	75	-	-
B	Yakıt türü	E5	E10	E15	E20
C	Emme haca basıncı (kPa)	125.3	127.7	130.1	132.5

Üç faktörlü ve karma kademeli deney tasarımı için tam faktöriyel deney sayısı $2^1.4^2 = 32$ olarak belirlenmiş ve L_{32} ortogonal dizisi kullanımına karar verilmiştir. Tablo 4, bu çalışmada kullanılan L_{32} tipi ortogonal Taguchi düzenini göstermektedir. Tablo 4'te; A satırı çevrim süresi değerlerini, B satırı karışımlardaki alkol içeriğine göre karışım tipini ve C satırı da yükseltme basıncı seviyelerini göstermektedir.

Tablo 4. L_{32} deneysel düzeni

Deney	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	**11**	**12**	**13**	**14**	**15**	**16**	**17**	**18**	**19**	**20**	**21**	**22**	**23**	**24**	**25**	**26**	**27**	**28**	**29**	**30**	**31**	**32**
A	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
B	1	1	1	1	2	2	2	2	3	3	3	3	4	4	4	4	1	1	1	1	2	2	2	2	3	3	3	3	4	4	4	4
C	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4

ANOVA analizi

Tanımlanan denklemler ve S/N oranı sonuçları kullanılarak, her faktörün optimum seviye kombinasyonu elde edilerek en iyi çıktı değeri belirlenmiştir. Ayrıca, sonuçları yorumlamak için hangi faktörün çıktı üzerinde daha etkili olduğunu belirlemek de gerekmektedir. Bu çalışmada, kontrol faktörlerinin çıktı değerleri üzerindeki etkisini değerlendirmek için istatistiksel bir model ve varyasyon analizi kullanılmıştır.
Elde edilen değerlerin etkisini kontrol etmek için bir varyans analizi (ANOVA) tablosu oluşturulabilir. Sapmaların karelerinin toplamı olan varyasyonun ortalaması (S), varyans (V) olarak ifade edilir. Denklem 5'de gösterildiği gibi varyans (V), varyasyon değerinin (S) serbestlik derecesine (f) bölünmesiyle elde edilir.

V = varyasyon / serbestlik derecesi = S / f (5)

Çoğunlukla, toplam çıkış değişimi (S_T), denklem 6'da gösterildiği gibi serbestlik dereceleriyle ve ortalamanın değişimi (S_m) denklem 7 ile hesaplanabilir.

$$S_T = y_1^2 + y_2^2 + \cdots + y_{32}^2 \qquad (f=32) \tag{6}$$

$$S_m = (y_1^2 + y_2^2 + \cdots + y_{32}^2)^2 / 32 \qquad (f=1) \tag{7}$$

Bu durumda, hata varyasyonu S_e denklem 8'de gösterildiği gibi hesaplanır.

$$S_e = S_T - S_m \tag{8}$$

Temel denklem 9'da gösterilen katkı derecesi (ρ), net varyasyonun (S'), toplam varyasyona (ST) bölünmesiyle elde edilir.

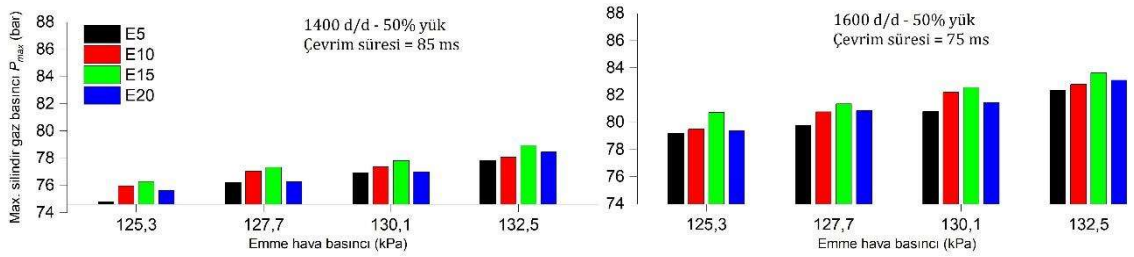
$$\rho = (S' / S_T) \times 100 \tag{9}$$

2.2 Bulgular

Seçilen çıkış parametreleri için en düşük emisyon seviyesine ve silindir hacmi başına daha yüksek güce ulaşmak amacıyla maksimum silindir gaz basıncının (P_{max}) yüksek olması istenmektedir. Bu nedenle P_{max} etkisi hesaba katılırken yanma performansını en üst düzeye çıkarmak ve değişkenliği en aza indirmek için "daha büyük daha iyi" yaklaşımı benimsenmiştir. Öte yandan, dizel motordan kaynaklanan CO, CO_2, CH_4, NH_3 ve NO_x emisyonları için zararlı ve toksik çevre emisyonlarını önlemek amacıyla "daha küçük daha iyi" yaklaşımı uygulanmıştır.

2.2.1. Silindir içi gaz basıncı (P_{max})

Şekil 2, deneysel çalışmadan elde edilen P_{max} değerlerini göstermektedir. Çevrim süresi azaldıkça, tüm yakıtlar için P_{max} değerleri artmıştır. Benzer şekilde P_{max} değerleri, emme havası basıncının yükselmesi ile orantılı olarak artmıştır. En yüksek P_{max} değerleri, tüm test koşulları için E15 karışımı kullanımında elde edilmiştir.



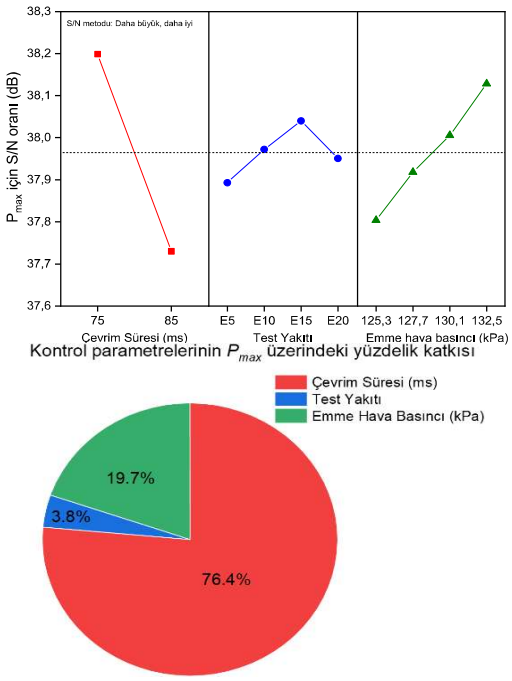
Şekil 2. Deneylerden elde edilen Pmax değerleri

Daha önce belirtildiği gibi, S/N oranı her bir kontrol faktörünün yanma parametreleri üzerindeki etkisini belirlemek için kullanılmıştır. Tüm kontrol faktörleri için optimum seviyeler en yüksek S/N oranına göre tanımlanmıştır. Şekil 3, P_{max} 'ın S/N oranlarını ve kontrol parametrelerinin P_{max} üzerindeki yüzdelik katkısını göstermektedir. Optimum silindir gaz basıncı, 75 ms'lik bir çevrim süresinde (A2), E15 yakıt kullanımında (B1) ve 132,5 kPa emme hava basıncında (C4) meydana gelmiştir. P_{max}'ın emme havası basıncındaki artışla beraber arttığı görülmüştür. Burada, P_{max} için S/N oranlarının 0,7 dB gibi nispeten dar bir aralıkta hesaplandığına dikkat edilmelidir.

ANOVA analizine dayalı P_{max} değerleri için kontrol faktörlerinin etkisi Şekil 3'te gösterilmiştir. Çevrim süresinin P_{max} değerleri üzerinde %76,4'lük baskın bir etkisi vardır. P_{max} değerleri üzerindeki ikinci en önemli parametre ise %19,7'lik bir oranla emme havası basıncıdır. Alkol-dizel karışımlarının ise %3,8 pay ile P_{max} değerleri üzerinde kayda değer bir etkisinin olmadığı görülmüştür. Çalışmada kullanılan dizel yakıtına en fazla %24 oranında alkol eklendiği için bu sonucun ortaya çıktığı, alkol oranının arttırılması ise etki payının artabileceği ihtimali göz ardı edilmemelidir.

Tek yönlü ANOVA analizinde olasılık (P-Değeri) %5'ten azdır, bu da verilen kararda %95 güven aralığına karşılık gelmektedir. Bu durum, korelasyonun istatistiksel olarak anlamlı olduğunu göstermektedir. R-Kare (R^2) regresyon

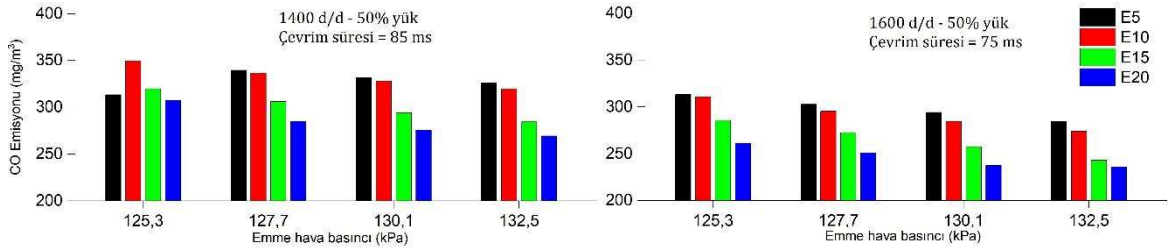
modelinin veri uyumunu temsil eden istatistiksel bir katsayıdır (uyum iyiliği) [23]. Bu çalışmada model özetindeki R^2, %98,9 olarak hesaplanmıştır. Model, deneysel değerlerin %100'üne ($R^2 = 1$) çok yakındır.



Şekil 3. Kontrol parametrelerinin P_{max} üzerindeki etkisi

2.2.2. Karbonmonoksit (CO) emisyonu

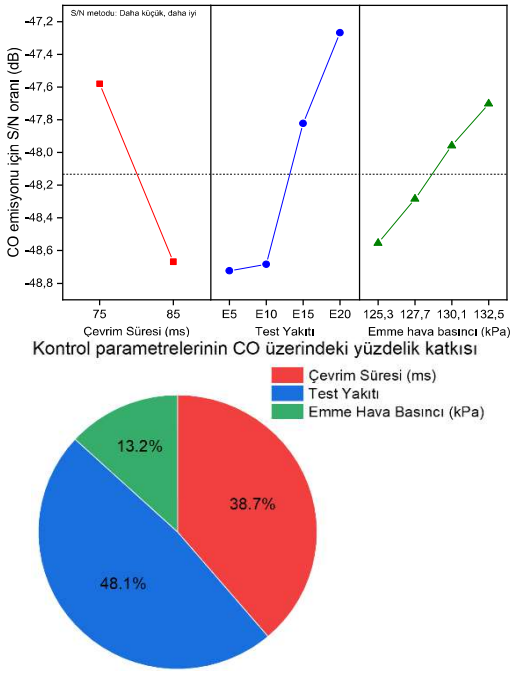
Şekil 4, deneysel çalışmada ölçülen CO emisyon değerlerini göstermektedir. Emme havası basıncı artırıldıkça, çevrim süresi kısaldıkça ve karışımdaki alkol içeriği arttıkça CO emisyonlarının oluşumunda azalma gözlenmiştir.



Şekil 4. Deneylerde ölçülen CO emisyon değerleri

Şekil 5'de kontrol parametrelerinin CO emisyonlarının oluşumu üzerindeki etkisi ortaya konulmuştur. CO emisyonu için optimum faktörler, 75 ms çevrim süresi (A2), E20 yakıt kullanımı (B4) ve 132,5 kPa emme basıncı (C4) koşullarında elde edilmiştir.

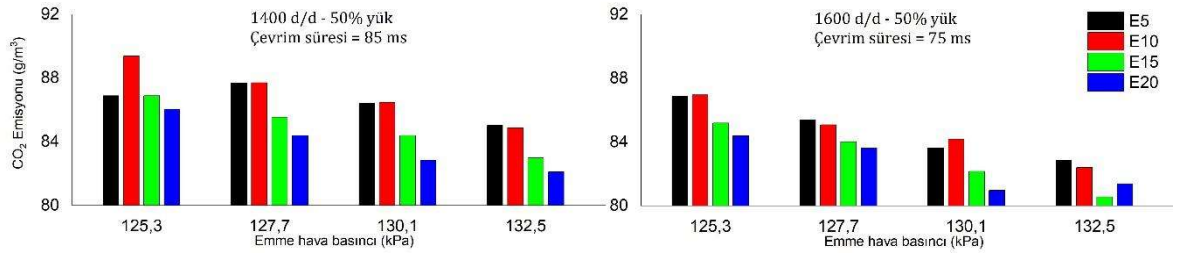
Optimize edilmiş koşulu belirlemek için her bir faktörün emisyon verilerine katkısı değerlendirildi. CO emisyon değerleri için ANOVA sonuçları Şekil 5'de verilmiştir. ANOVA analizine göre, karışım türü %48,1 ve çevrim süresi %38,7 pay ile CO emisyon oluşumuna en fazla katkıda bulunan faktörlerdir. Emme havası basıncının artmasıyla CO emisyonlarının azaldığı gözlemlenmiştir. Ancak, karışımdaki alkol miktarının artmasına kıyasla çok daha az bir düşüşe sebep olmuştur. Bu sonuçlar, yakıt içeriğindeki oksijenin kısmi yanmaya katkısının, hava içeriğindeki oksijenden daha yüksek olduğunu göstermektedir.



Şekil 5. Kontrol parametreleri için CO emisyonunun S/N oranları

2.2.3. Karbondioksit (CO_2) emisyonu

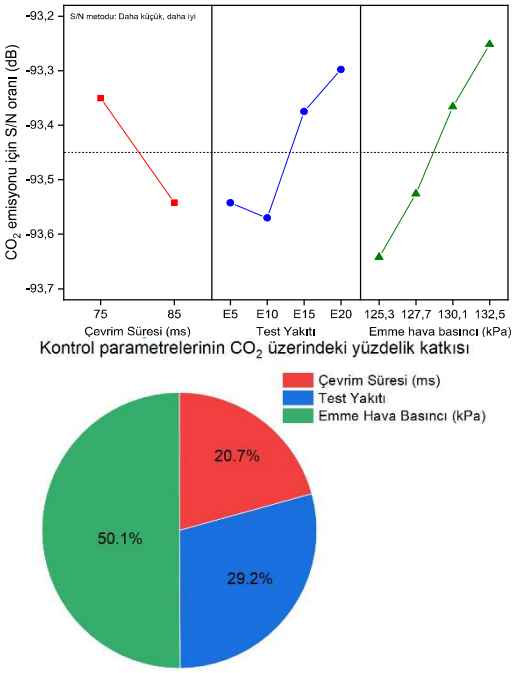
Şekil 6, deneysel çalışmada ölçülen CO_2 emisyon değerlerini göstermektedir. Bu çalışmada, CO_2 emisyonunun CO emisyonuna benzer bir eğilim gösterdiği gözlemlenmiştir. Emme havası basıncı arttıkça ve çevrim süresi azaldıkça, CO_2 emisyon miktarı azalmıştır. Ayrıca, karışımdaki alkol içeriği artışı ile orantılı olarak CO_2 emisyon miktarında azalma olmuştur.



Şekil 6. Deneylerde ölçülen CO_2 emisyon değerleri

Şekil 7, CO_2 için S/N oranlarını ve kontrol parametrelerinin CO_2 emisyon değerlerine etkisini göstermektedir. CO_2 emisyonu için optimum faktörler, 75 ms çevrim süresi (A2), E20 yakıt kullanımı (B4) ve 132,5 kPa emme hava basıncı (C4) ile elde edilmiştir. Kontrol parametrelerinin katkı yüzdesi, emme hava basıncının CO_2 emisyonlarının oluşumunu önemli ölçüde etkilediğini göstermektedir.

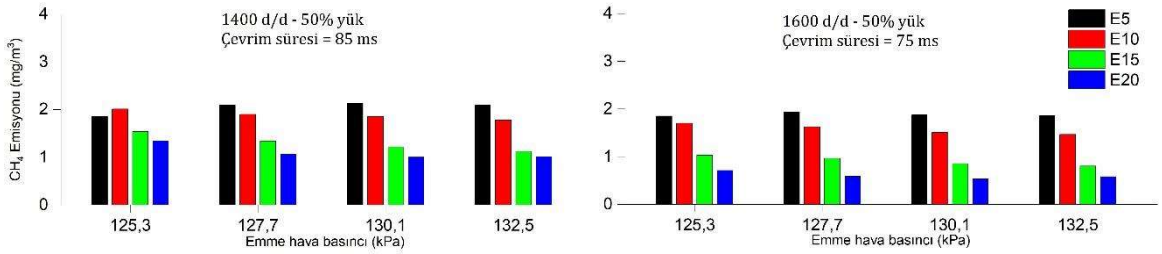
CO_2 emisyon değerleri için ANOVA sonuçları Şekil 7'de verilmiştir. Emme hava basıncı, %50,1 oranıyla CO_2 emisyonlarının oluşumuna en büyük katkıyı sağlamıştır. Bu sonuç, havadaki oksijenin karbon atomlarının tam oksidasyonuna önemli bir katkı sağladığını göstermektedir. CO_2 emisyonlarının oluşumunu çevrim süresinin %20,7 oranında ve karışım tipinin %29,2 oranında etkilediği bulunduğu hesaplanmıştır.



Şekil 7. Kontrol parametreleri için CO_2 emisyonunun S/N oranları

2.2.4. Metan CH_4 emisyonu

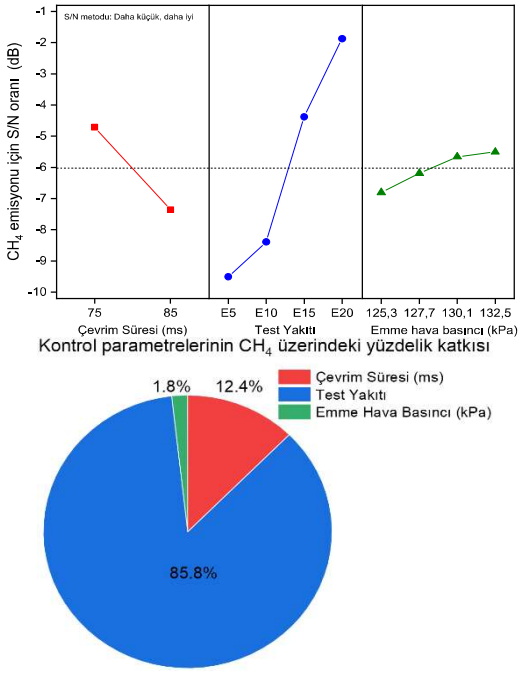
Metan, ulaşımda yakıtın eksik yanması sonucu oluşan bir emisyondur [25]. Şekil 8, deneysel çalışmada ölçülen CH_4 emisyon değerlerini göstermektedir. Emme havasındaki artışın CH_4 emisyonları üzerinde önemli bir etkisi olmadığı belirlenmiştir. CH_4 emisyonu oluşumunda karışımdaki alkol oranına bağlı bir azalma olduğu, çevrim süresi azaldığında ise CH_4 emisyonlarında hafif bir azalma olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 8. Deneylerde ölçülen CH_4 emisyon değerleri

Şekil 9, CH_4 emisyonu üzerindeki kontrol parametrelerinin S/N oranlarını göstermektedir. Şekil 9'da görüldüğü gibi, dizeldeki alkol oranının artırılması CH_4 emisyonlarında önemli azalmalar sağlamaktadır. Ayrıca, emme hava basıncının artırılması ve çevrim süresinin kısaltılmasının CH_4 emisyonlarını azaltmakta etkili olduğu ortaya çıkmıştır. CH_4 emisyonları için optimum değerler, 75 ms çevrim süresinde (A2), E20 yakıt tüketiminde (B4) ve 132,5 kPa emme hava basıncında (C4) elde edilmiştir.

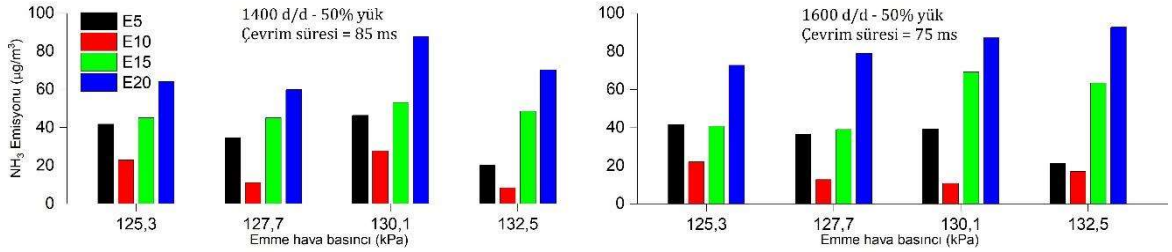
Şekil 9, CH_4 emisyonlarına ilişkin ANOVA analiz sonuçlarını göstermektedir. CH_4 emisyonlarında en baskın etken %85,8 oranıyla karışım tipidir. Karışımdaki alkol miktarı, CH_4 emisyonlarının oluşumu üzerinde %12,4 etkiye sahipken emme hava basıncının CH_4 emisyonlarının oluşumu üzerindeki etkisi yok denecek kadar azdır.



Şekil 9. Kontrol parametreleri için CH_4 emisyonunun S/N oranları

2.2.5 Amonyak (NH_3) emisyonu

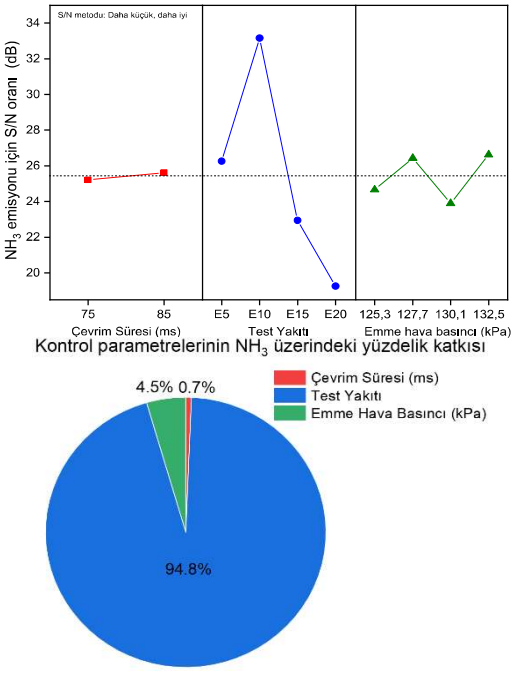
NH_3 emisyonları atmosferde HNO_3 ve H_2SO_4 ile hızlı bir şekilde reaksiyona girerek amonyum nitrat (NH_4NO_3) ve amonyum sülfat (NH_4SO_4) oluşturması sebebiyle havada ince partiküllerin oluşmasına ve görüş sorunlarına neden olur [36]. Bu nedenle, dizel motorlar için NH_3 emisyonunun yeni nesil emisyon standartlarında yer alması beklenmektedir. Şekil 10, deneysel çalışmada ölçülen NH_3 emisyon değerlerini göstermektedir. Genel olarak, artırılan emme havası basıncı ile NH_3 emisyonlarında hafif bir artış gözlenmiştir. Egzoz hattındaki en düşük NH_3 oluşumu, E10 karışımı kullanıldığında ölçülmüştür.



Şekil 10. Deneylerde ölçülen NH_3 emisyon değerleri

Şekil 11, kontrol parametreleri için NH_3 emisyonunun S/N oranlarını göstermektedir. Optimum NH_3 emisyonları, 85 ms çevrim süresi (A1), E10 yakıt kullanımı (B2) ve 132,5 kPa emme hava basıncı (C4) değerlerinde gerçekleşmiştir. İstatistiksel olarak, en büyük sapmalar NH_3 emisyonunda gözlemlenmiştir.

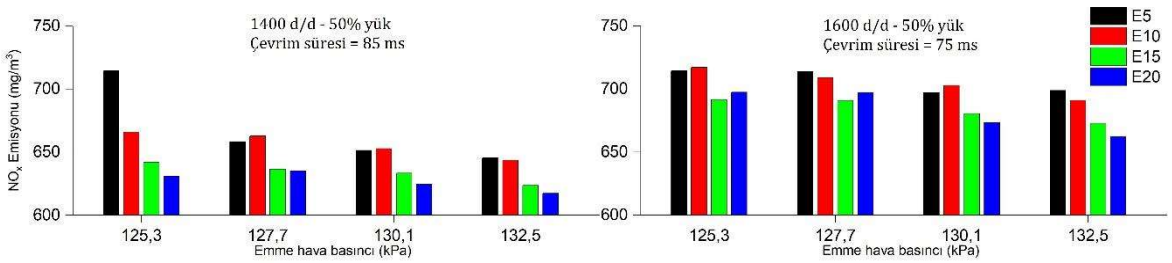
CO_2 emisyon değerlerine ilişkin ANOVA sonuçları Şekil 11'de verilmiştir. ANOVA analiz sonuçları, karışım tipinin %94,8'lik bir oranla NH_3 emisyonunun oluşumuna katkıda bulunan en baskın faktör olduğunu göstermektedir. Bu çalışmada, en düşük R^2 değeri %89,4 oranla NH_3 değerleri için elde edilmiştir. Çevrim süresinin olasılığının 0,2663 olması modelin istatistiksel olarak geçerli olmadığını göstermektedir.



Şekil 11. Kontrol parametreleri için NH3 emisyonunun S/N oranları

2.2.6. Nitrojen oksit (NOx) emisyonu

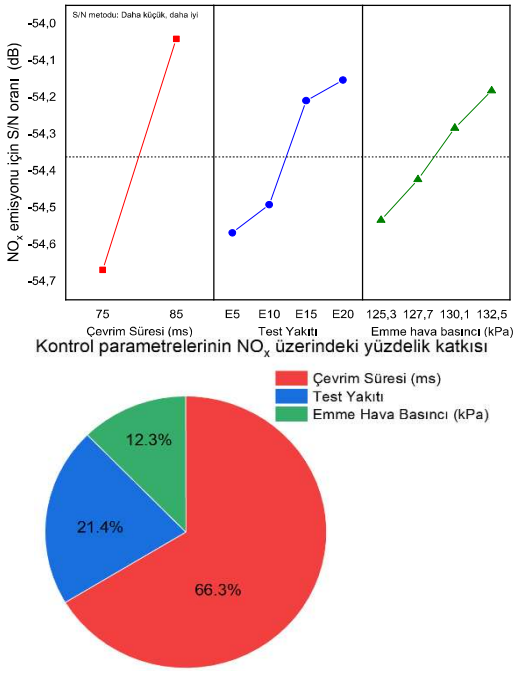
Bu çalışmada NO_x gazı, NO ve NO_2 gazlarının karışımı olarak ifade edilmiştir. Testlerde, NO_x gaz bileşenlerinin genel olarak %91,5 NO ve %8,5 NO_2'den oluştuğu hesaplanmıştır. Şekil 12, deneysel çalışmada ölçülen NO_x emisyon değerlerini göstermektedir. Çevrim süresi azaldıkça NO_x emisyon miktarında önemli bir artış olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca E15 ve E20 yakıtları kullanıldığında E5 kullanımına kıyasla NO_x emisyonlarında önemli bir azalma olmuştur.



Şekil 12. Deneylerde ölçülen NO_x emisyon değerleri

Şekil 13, kontrol parametreleri için NO_x emisyonunun S/N oranlarını göstermektedir. NO_x emisyonu için optimum değerler, 85 ms döngü süresi (A1), E20 yakıt kullanımı (B4) ve 132,5 kPa emme hava basıncı (C4) ile elde edilmiştir.

NO_x emisyon değerleri için ANOVA sonuçları Şekil 13'te verilmiştir. Çevrim süresi, NO_x emisyonları üzerinde %66,3 oranında baskın bir etkiye sahiptir. NO_x emisyonunu etkileyen bir diğer önemli kontrol parametresi ise %21,4 'lük oranla emme hava basıncıdır.



Şekil 13. Kontrol parametreleri için NO_x emisyonunun S/N oranları

3. Sonuç (Conclusions)

Bu çalışmada etanol/dizel karışımları kullanılan bir dizel motorda L_{32} ortogonal Taguchi yöntemi kullanılarak optimum çalışma koşulları belirlenmiştir. Tepki değişkenlerinin optimum değerleri, Taguchi yöntemindeki deney tasarımına göre S/N oranı (dB) kullanılarak belirlenmiş ve kontrol parametrelerinin değişkenler üzerindeki etki oranları ANOVA analizi ile hesaplanmıştır. Analizde kontrol parametreleri; çevrim süresi, karışımdaki alkol miktarı ve emme hava basıncı olarak seçilmiştir. ANOVA analizleri sonucunda tüm model için R^2 değerinin %90 ve üzeri olarak bulunması, Taguchi yönteminin dizel motor testlerinden elde edilen deneysel değerler ile kontrol parametrelerinin optimum kombinasyonu arasında iyi bir korelasyon kurduğunu göstermektedir. İstatistiksel analizlerin sonucunda, emme hava basıncı ve karışımdaki etanol miktarının artmasıyla, NH_3 emisyonu dışındaki yanma parametrelerinde ve emisyon değerlerinde iyileştirmeler yapılabileceği ortaya konulmuştur.

P_{max} için S/N oranları oldukça dar bir dB aralığında meydana gelmiştir. Egzoz emisyon değerlerinin S/N oranları incelendiğinde, karışımdaki etanol miktarının artırılması ve emme manifoldundaki emme hava basıncının artırılması optimum kontrol faktörleri olarak belirlenmiştir. CO, CO_2 ve CH_4 emisyon değerlerinin çevrim süresi kısaldıkça (veya motor devri arttıkça), NO_x emisyon değerlerinin ise çevrim süresi arttıkça (veya motor devri azaldıkça) iyileştiği belirlenmiştir.

Her bir değişken için ANOVA analizlerinde R^2 değeri %90 ve üzerinde bulunmuştur. Bu değer, deneysel verilerin istatistiksel çalışma için tamamen uygun olduğunu göstermiştir. Karışımdaki etanol miktarının CO, CH_4 ve NH_3 emisyonlarına etkisinin sırasıyla %48,1, %85,8 ve %94,8 olduğu, çevrim süresinin NO_x emisyonlarına etkisinin %66,3 olduğu ve emme hava basıncının CO_2 emisyonlarına etkisinin %50,1 olduğu tespit edilmiştir. Çalışmada en büyük sapmalar NH_3 emisyonlarında elde edilmiştir. NH_3 emisyonunun ANOVA analizinde, P-Değeri diğer analizlere kıyasla oldukça yüksek bulunmuştur.

Kaynaklar (References)

[1] European Commission, A Roadmap for moving to a competitive low carbon economy in 2050, COM(2011) 112 Final. 34 (2011).
[2] L. Fridstrøm, From innovation to penetration: Calculating the energy transition time lag for motor vehicles, *Energy Policy*. 108 (2017). https://doi.org/10.1016/j.enpol.2017.06.026.
[3] I. Dincer, Y. Bicer, Enhanced dimensions of integrated energy systems for environment and sustainability, in: Integr. Energy Syst. *Multigeneration*, 2020. https://doi.org/10.1016/b978-0-12-809943-8.00007-8.
[4] L.L.N. Guarieiro, A.F. de Souza, E.A. Torres, J.B. de Andrade, Emission profile of 18 carbonyl compounds, CO, CO2, and NOx emitted by a diesel engine fuelled with diesel and ternary blends containing diesel, ethanol and biodiesel or vegetable oils, *Atmos. Environ*. 43 (2009). https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2009.02.036.
[5] L. Zhu, C.S. Cheung, W.G. Zhang, Z. Huang, Emissions characteristics of a diesel engine operating on

biodiesel and biodiesel blended with ethanol and methanol, *Sci. Total Environ*. 408 (2010). https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2009.10.078.
[6] S. Natarajan, K. Pitchandi, N. V. Mahalakshmi, Optimization of performance and emission characteristics of PPCCI engine fuelled with ethanol and diesel blends using grey-Taguchi method, *J. Therm. Sci.* 27 (2018). https://doi.org/10.1007/s11630-018-0988-1.
[7] J. Yan, R. Rogalla, T. Kramer, Diesel combustion and transient emissions optimization using Taguchi methods, in: *SAE Tech. Pap.*, 1993. https://doi.org/10.4271/930600.
[8] V.H. Wilson, Udayakumar, Optimization of diesel engine parameters using Taguchi method and design of evolution, *J. Brazilian Soc. Mech. Sci. Eng.* 34 (2012). https://doi.org/10.1590/S1678-58782012000400001.
[9] S. Uslu, M. Aydın, Effect of operating parameters on performance and emissions of a diesel engine fueled with ternary blends of palm oil biodiesel/diethyl ether/diesel by Taguchi method, *Fuel.* 275 (2020). https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.117978.
[10] A. Sharma, N.K. Maurya, Y. Singh, N.K. Singh, S.K. Gupta, Effect of design parameters on performance and emissions of DI diesel engine running on biodiesel-diesel blends: Taguchi and utility theory, *Fuel.* 281 (2020). https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.118765.
[11] W. Zhang, M. Likich, B. Butler, Development of a Robust AIS Parametric Model for V8 Engines Using Design for Six Sigma Approach, in: *SAE Tech. Pap.*, 2018. https://doi.org/10.4271/2018-01-0140.
[12] N.A. Ansari, A. Sharma, Y. Singh, Performance and emission analysis of a diesel engine implementing polanga biodiesel and optimization using Taguchi method, *Process Saf. Environ. Prot.* 120 (2018). https://doi.org/10.1016/j.psep.2018.09.009.
[13] R.A. Baranescu, S.D. Desai, D.A. Ginder, Optimization analysis of a diesel engine using cycle analysis and Taguchi Methods, in: *SAE Tech. Pap.*, 1989. https://doi.org/10.4271/891895.
[14] Z. Win, R.P. Gakkhar, S.C. Jain, M. Bhattacharya, Investigation of diesel engine operating and injection system parameters for low noise, emissions, and fuel consumption using Taguchi methods, *Proc. Inst. Mech. Eng. Part D J. Automob. Eng.* 219 (2005). https://doi.org/10.1243/095440705X34865.
[15] K. Alashe, W., Barnes, E., Bath, K., Jacobson, M. O'Keefe, Engine idle quality robustness using Taguchi methods, in: Proc. Symp. Taguchi Methods, *American Supplier Institute Press,* Dearborn, 1994: pp. 111–121.
[16] H.W. Wu, Z.Y. Wu, Combustion characteristics and optimal factors determination with Taguchi method for diesel engines port-injecting hydrogen, *Energy.* 47 (2012). https://doi.org/10.1016/j.energy.2012.09.027.
[17] M.R. Saxena, R.K. Maurya, Optimization of engine operating conditions and investigation of nano-particle emissions from a non-road engine fuelled with butanol/diesel blends, *Biofuels.* 11 (2020). https://doi.org/10.1080/17597269.2017.1378987.
[18] M. Mehregan, M. Moghiman, A.A. Tootoonchi, A Taguchi approach for numerical investigation of CO emission from a non-premixed methane–air flame, *J. Brazilian Soc. Mech. Sci. Eng.* 39 (2017). https://doi.org/10.1007/s40430-016-0529-3.
[19] M. Muqeem, A.F. Sherwani, M. Ahmad, Z.A. Khan, Taguchi based grey relational analysis for multi response optimisation of diesel engine performance and emission parameters, *Int. J. Heavy Veh. Syst.* 27 (2020). https://doi.org/10.1504/IJHVS.2020.109287.
[20] S. Saravanan, G. Nagarajan, S. Sampath, Multi response optimization of NOx emission of a stationary diesel engine, *Fuel.* 89 (2010). https://doi.org/10.1016/j.fuel.2010.05.015.
[21] S. Manigandan, P. Gunasekar, S. Nithya, J. Devipriya, S. Raja, S. Venkatesh, Influence of injection parameters on NOx emission from biodiesel powered diesel engine by Taguchi technique, *Int. J. Ambient Energy.* 41 (2020). https://doi.org/10.1080/01430750.2018.1492447.
[22] R.K. Rai, R.R. Sahoo, Taguchi-Grey and ANOVA optimization techniques for engine performance with water in diesel emulsion fuels, *Heat Transf.* 49 (2020). https://doi.org/10.1002/htj.21785.
[23] G. Taguchi, S. Chowdhury, Y. Wu, Taguchi's Quality Engineering Handbook, 2007. https://doi.org/10.1002/9780470258354.
[24] Taguchi.G, S. Konishi, *Taguchi methods, orthogonal arrays and linear graphs: Tools for quality engineering,* Dearbom, Am. Supplier Inst. (1987).
[25] T.E. Lipman, M.A. Delucchi, Emissions of nitrous oxide and methane from conventional and alternative fuel motor vehicles, *Clim. Change.* 53 (2002). https://doi.org/10.1023/A:1015235211266.
[26] M. Wang et al., Synergistic HNO3–H2SO4–NH3 upper tropospheric particle formation, *Nature.* 605 (2022) 483–489. https://doi.org/10.1038/s41586-022-04605-4.