



# Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi

*Araştırma Makalesi*

## Atık Lastik Piroliz Yağı-Dizel Karışımları ile Çalışan Bir Dizel Motorda Emisyon ve Performansın Eşzamanlı Tahminine Yönelik Bir Yanıt Yüzey Metodolojisinin Geliştirilmesi

 Samet USLU<sup>a\*</sup>

<sup>a</sup> *Makine Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Karabük Üniversitesi, Karabük, TÜRKİYE*

\* Sorumlu yazarın e-posta adresi: [sametuslu@karabuk.edu.tr](mailto:sametuslu@karabuk.edu.tr)

DOI : 10.29130/dubited.546020

### ÖZET

Günümüzde, artan enerji tüketimi, fosil yakıt rezervlerinin azalması ve katı emisyon standartlarından dolayı alternatif temiz yakıt çalışmaları son derece önemli hale gelmiştir. Bununla birlikte, atık ürünlerin alternatif yakıt olarak değerlendirilmesi hayati önem taşımaktadır. Atıkların dizel motorlarda alternatif yakıt olarak değerlendirilmesi adına atık lastik piroliz yağı (ALPY) önemli bir yakıt türüdür. Bu çalışmada, dizel yakıt ile farklı oranlarda karıştırılarak hazırlanan ALPY-dizel yakıt karışımlarının (ALPY20, ALPY40 ve ALPY60) kullanıldığı tek silindirli dizel bir motorda püskürtme basıncı (205 bar, 225 bar ve 245 bar) ve motor yükü (50%, 75% ve 100%) değişimlerinin etkileri deneysel olarak incelenmiş ve yanıt yüzey metodolojisi (RSM) kullanılarak analiz edilmiştir. Test sayılarının dizaynı ve analizi için sırasıyla deney tasarımı (DOE) ve varyans analizi (ANOVA) kullanılmıştır. Analiz için püskürtme basıncı, yakıt karışım oranı ve motor yükü giriş parametreleri olarak seçilirken, fren efektif verim (FEV), egzoz gaz sıcaklığı (EGS), azot oksitler (NO<sub>x</sub>), karbon monoksit (CO), hidrokarbon (HC) ve is emisyonları çıkış parametreleri olarak seçilmiştir. FEV, EGS, CO, HC, NO<sub>x</sub> ve is değerlerini tahmin etmek ve optimizasyon yapmak için RSM denklemleri ve RSM optimizasyonu uygulanmıştır. Analiz sonuçlarına göre, optimum çalışma parametreleri %30.51 ALPY oranı, 225 bar püskürtme basıncı ve %62.12 motor yükü olarak tespit edilmiştir. Bu optimum şartlarda elde edilen sonuçlar ise FEV, EGS, CO, HC, NO<sub>x</sub> ve is için sırasıyla %26.89, 399.31 °C, %0.19, 9.09 ppm, 474.73 ppm ve %24.40 olarak bulunmuştur. Bu çalışma, RSM'nin farklı yakıt karışımları kullanılan düşük güçlü bir dizel motorun emisyon ve performans değerlerini tahmin etmede etkili ve güvenilir bir yöntem olduğunu göstermektedir.

**Anahtar Kelimeler:** Yanıt yüzey metodolojisi, atık lastik piroliz yağı, dizel motor.

Improving of a Response Surface Methodology for the Simultaneous Prediction of Emission and Performance in a Diesel Engine Working with Waste Tire Pyrolysis Oil

## ABSTRACT

Currently, due to the increasing energy consumption, the reduction of fossil fuel reserves and solid emission standards, alternative clean fuel works have become extremely important. In addition, it is of vital importance to evaluate waste products as an alternative fuel. Waste tire pyrolysis oil (WTPO) is an important fuel type for the purpose of evaluating to waste products as an alternative fuel in diesel engines. In this study, the impacts of injection pressure (205 bar, 225 bar and 245 bar) and engine load (50%, 75% and 100%) on engine emission and performance were examined experimentally and analyzed with response surface methodology (RSM) on a low power diesel engine which is operating with WTPO and diesel fuel blends (WTPO20, WTPO40 and WTPO60). Design of experiments (DOE) and analysis of variance (ANOVA) were used for design and analysis of test numbers, respectively. For analysis, the injection pressure, fuel blending ratio and engine load are selected as input parameters, while the brake thermal efficiency (BTE), exhaust gas temperature (EGT), nitrogen oxides (NO<sub>x</sub>), carbon monoxide (CO), hydrocarbon (HC) and smoke are selected as output parameters. RSM equations and RSM optimizer were applied to estimate and optimize the BTE, EGT, CO, HC, NO<sub>x</sub> and smoke values. According to the results of the analysis, optimum operating parameters were determined as 30.51% ALPY ratio, 225 bar injection pressure and 62.12% engine load. The results obtained in these optimum conditions were found to be 26.89%, 399.31%, 0.19%, 9.09 ppm, 474.73 ppm and 24.40% for FEV, EGS, CO, HC, NO<sub>x</sub> and smoke. This study shows that RSM is an effective and reliable method for predicting the exhaust emission and engine performance values of a low power diesel engine using different fuel blends.

*Keywords: Response surface methodology, waste tire pyrolysis oil, diesel engine.*

## I. GİRİŞ

**D**izel motorlar yüksek verimlerinden dolayı tarım, ulaştırma ve ticari amaçlı olarak yaygın kullanım alanına sahiptir [1]. Aynı zamanda, yüksek emisyon değerlerinden dolayı çevre kirliliğinin ana sebeplerden biridir [2]. Dizel yakıtın içten yanmalı motorlarda (İYM) yanması sonucu atmosfere zararlı gazlar salınmaktadır. Örneğin; 1 litre dizel yakıtın yanması sonucu 2.9 kilogram sera gazı atmosfere salınmaktadır [3]. Bu emisyonların atmosfere salınması başta insanlar olmak üzere birçok canlının yaşamını etkilemekte, ölümlere ve ciddi rahatsızlıklara sebep olmaktadır [4]. Bununla birlikte, bilim adamları, hızla artan dünya nüfusundan ve günümüzdeki araçların neredeyse tamamına yakınının İYM kullanıyor olmasından dolayı fosil yakıt rezervlerinin yakın gelecekte yetersiz olacağını düşünmektedirler [5,6]. Fosil yakıt rezervlerindeki azalma, araştırmacıları İYM’de kullanım için alternatif yakıt arayışı içine sokmuştur [7]. Bu yüzden, araştırmacılar alkol, biyodizel, atık üründen elde edilen yakıtlar ve yağlar gibi alternatif temiz yakıtları İYM’lerde kullanmaya başlamışlardır [8]. Atık ürünlerden elde edilen alternatif yakıtlar çevre kirliliği ve mali konularla başa çıkma konusunda etkili yöntemlerden biri olarak kabul edilmektedir. Ayrıca, başlıca atık ürünlerden birisi olan taşıt lastiklerinin imha edilme probleminin gün geçtikçe büyümesi, atık lastikten alternatif yakıt üretilmesi konusunda teşvik edici olmuştur [9]. Ortalama bir taşıt lastiğinin ömrü beş yıl olarak kabul edilmektedir ve dünya üzerinde yılda yaklaşık 1.5 milyar atık taşıt lastiği ortaya çıkmaktadır [10]. Bu lastiklerin imha edilmesi yerine yakıt olarak değerlendirilmesi son derece önemlidir. Ayrıca, pirolitik akışkanların yüksek yoğunluğa sahip olması da bir diğer olumlu yanıdır. Lastiğin pirolizinden elde edilen geri kazanılmış bir pirolitik yağ, dizel ve benzin gibi ısı değeri yaklaşık 41-44 MJ / kg olan siyah kahverengi bir sıvıdır [11].

Araştırmacılar ve taşıt üreticileri, alternatif yakıt kullanımının motor performans ve emisyonlarına etkilerini deneysel olarak incelemektedirler. Ancak, bu deneyler zaman alıcı ve maliyetli olabiliyor. Bu yüzden, araştırmacılar daha az sayıda deney ile aynı doğrulukta sonuçlar alabilmek için bilgisayar tabanlı analiz programlarına yönelmişlerdir. Bu amaçla, RSM, matematiksel yöntemler, lineer regresyon ve yapay sinir ağıları gibi çeşitli yöntemler kullanılmaktadır [12].

RSM, birçok bilimsel alanda optimizasyon için tercih edilen, test sayısını azaltan, işgücü tasarrufu sağlayan ve klasik yöntemlere göre ekonomik olan, kendini kanıtlamış güçlü bir uygulama olarak kabul edilmektedir [13,14]. RSM, en yüksek model verimliliğini elde etmek için çeşitli parametrelerin etkilerini ve parametreler arasındaki karşılıklı etkiyi aynı anda optimize etmek için kullanılan istatistiksel-matematiksel bir yöntemdir [15]. Bazı araştırmacılar, giriş faktörlerinin istenen çıkış parametreleri üzerindeki etkisini incelemek için RSM'yi kullanmışlardır [16–21].

Bu çalışmanın temel amacı, çeşitli deneysel tasarım / işletim faktörlerinin FEV, EGS, CO, HC, NO<sub>x</sub> ve is üzerindeki etkileşimlerini analiz etmektir. Emisyonları (CO, HC, NO<sub>x</sub> ve is) ve EGS'yi azaltmak, FEV'i en üst seviyeye çıkarmak amacıyla giriş parametrelerinin (yakıt karışımı, motor yükü ve püskürtme basıncı) optimum kombinasyonuna ulaşmak için RSM geliştirilmiştir. Farklı püskürtme basıncında ve motor yükünde, farklı oranlarda ALPY içeren yakıt karışımları ile deneyler yapılmıştır ve deney verileri, DOE ile analiz edilmiştir. Çıkış parametrelerini etkileyen önemli girdi faktörlerini belirlemek için bir ANOVA analizi yapılmıştır. En iyi motor performansı ve yanma emisyonları için optimum giriş parametreleri değerleri RSM optimizasyonu kullanarak belirlenmiştir.

## II. MALZEME ve YÖNTEM

### A. DENEY YAKITLARI

Bu çalışmada kullanılan veriler daha önce yapılan çalışmadan alınmıştır [22]. Bu çalışmada ALPY'nin dizel ile %20, %40 ve %60 oranında hacimsel olarak karıştırılması ile elde edilen ve ALPY20, ALPY40 ve ALPY60 olarak adlandırılan üç test yakıtı hazırlanmıştır. Dizel yakıt ve ALPY özellikleri Tablo 1'de gösterilmektedir.

**Tablo 1.** Deney yakıtlarının özellikleri [23–26].

Özellikler	Dizel	ALPY	Analiz Yöntemi
Setan sayısı	>50	<40	EN ISO 5165
Yoğunluk (kg/m <sup>3</sup> , 15 °C)	0.839	0.904	EN ISO 12185
Aromatik içerik (% , m/m)	26	39.3	EN ISO 4264
Parlama noktası (°C)	50	43	ASTM D 93
Kinematik viskozite (mm <sup>2</sup> /s- at 40 °C)	3.09	2.164	EN ISO 3104
Alt ısı değer (kJ/kg)	43000	40950	ASTM D 240
Su içeriği (mg/kg)	200	1404	EN ISO 12937
Sülfür içeriği (mg/kg)	≈0	4327	EN ISO 8754
Kül içeriği (% , m/m)	0.01	0.0005	EN ISO 6245

### B. DENEY DÜZENEGİ

ALPY/dizel yakıt karışımlarının, farklı motor yüklerinde (50%, 75% ve 100%) ve farklı püskürtme basınçlarında (205 bar, 225 bar ve 245 bar), tek silindirli, dört zamanlı ve hava soğutmalı bir dizel

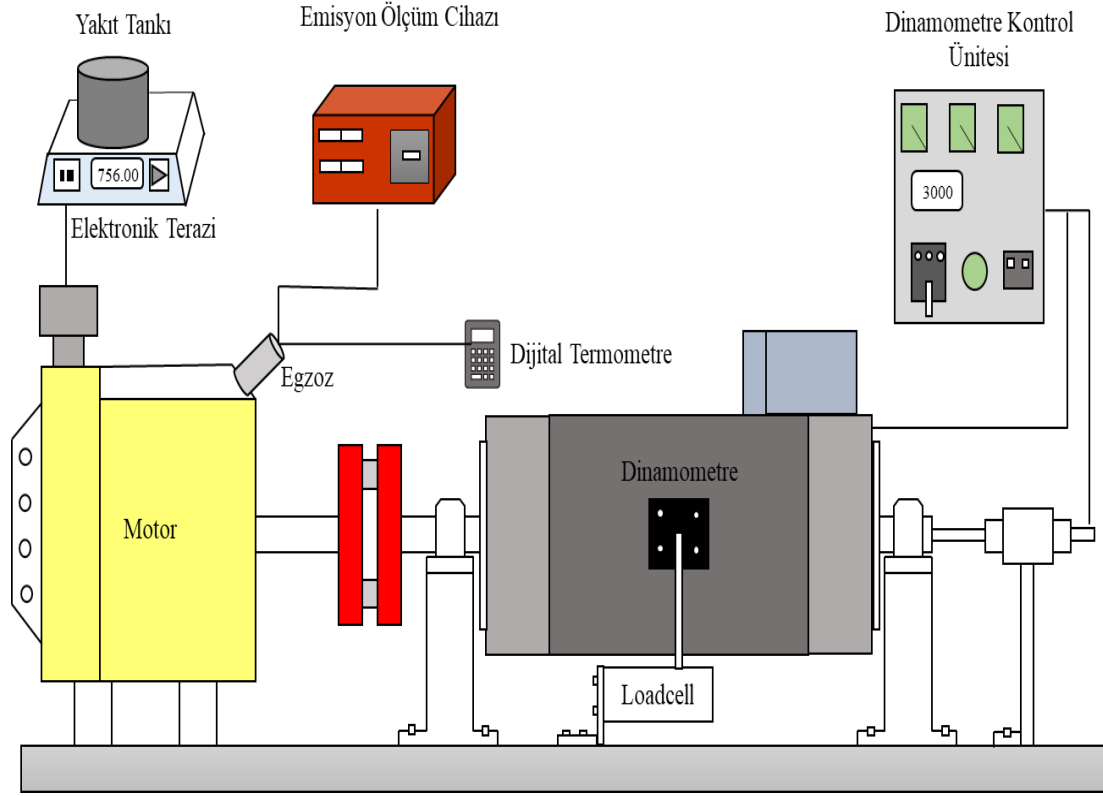
motorda kullanımının etkilerini incelemek amacıyla oluşturulan deney düzeneği Şekil 1’de gösterilmektedir. Deney düzeneği, dizel motor, dinamometre ve dinamometre kontrol ünitesi, egzoz emisyonu ölçüm cihazı, elektronik terazi ve dijital termometreden oluşmaktadır. Kullanılan motorun teknik özellikleri Tablo 2’de gösterilmektedir.

Kronometre ve hassas terazi kullanılarak belirli bir zaman aralığında harcanan yakıt miktarı kütleli olarak ölçülmüş ve birim zamanda tüketilen yakıt miktarı hesaplanmıştır. Hesaplanan yakıt miktarı motor gücüne oranlanarak fren özgül yakıt tüketimi (FÖYT) bulunmuştur. Bulunan fren özgül yakıt tüketimi ve yakıtın alt ısı değeri (YAID) kullanılarak denklem 1’de gösterildiği gibi fren efektif verim ( $\eta_e$ ) hesaplanmıştır.

$$\eta_e = \left( \frac{3600}{FÖYT \times YAID} \right) \times 100 \quad (\%) \quad (1)$$

**Tablo 2.** Deney motorunun teknik özellikleri.

Model	Katana KM 170 FE
Tip	Dört zamanlı, tek silindirli ve direkt püskürtmeli dizel motor
Çap (mm) x Strok (mm)	70 x 55
Maksimum motor devri (rev/min)	3600
Silindir hacmi (cm <sup>3</sup> )	211
Sıkıştırma oranı	18.0:1
Maksimum güç (kW)	4.7
Püskürtme basıncı (bar)	225±5
Emiş	Doğal
Soğutma sistemi	Hava soğutmalı



Şekil 1. Deney düzeneğinin şematik görünümü.

### C. YANIT YÜZEY METODOLOJİSİ

RSM mühendislik problemlerinin analizi için kullanışlı bir yöntemdir. RSM, birçok değişkenden etkilenen zorlukların modellenmesi ve incelenmesi için faydalı olan istatistiksel yöntemlerin bir araya getirilmesidir. RSM'nin amacı, çıktılar ve sayısız faktör arasındaki ilişkiyi belirlemek ve ayrıca bu faktörleri iyileştirmektir [27]. Bu ilişkiler, en küçük kareler tekniği ile modellenmiştir. Birçok bilimsel konuda,  $y$  cevabı ve girişler veya kontrol edilebilir değişkenler kümesi arasında bir ilişki vardır ( $x_1, x_2, \dots, x_n$ ). Bu ilişki  $y = f(x_1, x_2, \dots, x_n) + \varepsilon$  şeklinde sunulabilir, burada  $\varepsilon$  yanıtta tespit edilen hatadır. Beklenen yanıt  $E(y) = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$  olacak şekilde belirtirsek,  $b_{yy} = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$  tarafından sunulan yüzeye yanıt yüzeyi (response surface) denir. RSM'deki birincil aşama, yanıt ile bağımsız faktörler arasında uygun bir ilişki tespit etmektir. Tipik olarak, bu ilişkiyi sunmak için aşağıdaki gibi gösterilebilecek olan ikinci dereceden bir denklem kullanılır [28]:

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \sum_{j \geq i}^k \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (2)$$

Merkezi Kompozit Tasarım (CCD) nispeten doğru tahmin sonuçları verdiği için tercih edilmiştir. Giriş faktörleri ve seviyeleri Tablo 3'te gösterilmektedir. Bu çalışmada, bir tam faktöriyel dizayn (full factorial design) olan CCD'nin faktöriyel kısmı, her faktör için üç farklı seviyedeki değişkenlerin tüm kombinasyonlarında (yüksek, orta ve düşük) kullanılmıştır. RSM modeli oluşturmak için MINITAB17 programı [29] kullanılmıştır. Tablo 4, CCD tekniği ile belirlenmiş testlerin özelliklerini

göstermektedir. Tablo 4'te gösterildiği gibi, çeşitli giriş faktörü kombinasyonları için toplam 20 deney bulunmaktadır. RSM modeli için FEV (%), CO (%), HC (ppm), is (%) ve NO<sub>x</sub> (ppm) çıkış parametreleri olarak seçilirken, ALPY karışım oranı, püskürtme basıncı ve motor yükü giriş parametreleri olarak seçilmiştir.

**Tablo 3.** Giriş faktörleri ve seviyeleri.

Faktörler	Seviyeler		
	Düşük	Orta	Yüksek
Yakıt karışımı (% hac.)	20	40	60
Püskürtme basıncı (bar)	205	225	245
Motor yükü (%)	50	75	100

**Tablo 4.** RSM ile ilgili testlerin tasarım matrisi.

Std Order	Run Order	Pt Type	Blocks	Yakıt karışımı (% hac.)	P. basıncı (bar)	Motor yükü (%)	FEV (%)	EGS (°C)	HC (ppm)	CO (%)	NO <sub>x</sub> (ppm)	is (%)
12	1	-1	1	40	185	100	26.92	13.37	55	2.11	564	74
17	2	0	1	60	205	50	25.43	14.16	17	0.07	470	26
15	3	0	1	20	205	75	27.19	13.24	17	0.14	557	35
18	4	0	1	20	185	50	25.22	14.27	15	0.06	354	34.4
1	5	1	1	40	225	100	27.34	13.17	37	1.87	597	56.4
4	6	1	1	60	185	75	26.74	13.46	21	0.18	600	44
14	7	-1	1	40	225	50	25.74	13.99	12	0.05	427	22.2
6	8	1	1	40	185	50	25.28	14.24	14	0.07	386	33.6
16	9	0	1	60	205	100	26.72	13.47	45	2.19	880	54
11	10	-1	1	60	225	75	27.23	13.22	19	0.12	642	34
20	11	0	1	40	205	75	27.31	13.18	16	0.13	578	33.5
19	12	0	1	20	225	75	27.53	13.08	14	0.13	579	31.6
7	13	1	1	20	225	100	27.36	13.16	43	1.93	523	60.4
2	14	1	1	20	185	100	26.84	13.41	58	2.24	516	79
10	15	-1	1	20	205	50	25.54	14.1	13	0.05	359	24.2
5	16	1	1	40	205	100	27.38	13.15	41	1.89	592	59
13	17	-1	1	40	185	75	27.11	13.28	18	0.14	561	46.5
9	18	-1	1	60	225	100	26.72	13.47	33	2	843	59.7
3	19	1	1	20	225	50	25.68	14.02	11	0.05	400	19.8
8	20	1	1	60	185	50	25.06	14.36	15	0.08	474	36

### C. MODELİN ANALİZİ VE DEĞERLENDİRİLMESİ

Tablo 5,

Tablo 6 ve Tablo 7 sırasıyla, FEV-EGS, CO-HC ve NO<sub>x</sub>-is için ANOVA tablosunu göstermektedir. Her faktörün yanıtlar üzerindeki önemini kontrol etmek için olasılık değerleri (p-değerleri)

kullanılmıştır. Tablo 5 lineer olarak, motor yüküne, yakıt karışım oranına ve püskürtme basıncına karşılık gelen p değerlerinin, %95'lik bir güven derecesi ile %0.05'ten daha az olduğunu ve FEV-EGS parametrelerini tahmin etmedeki önemini göstermektedir. Aynı şekilde, motor yükü ve yakıt karışım oranı faktörlerinin karesiyle ilgili p değerleri 0.05'ten azdır. Ancak püskürtme basıncının p değeri 0.05'ten büyüktür.

Tablo 6'ya bakıldığında CO ve HC için lineer açıdan p değerleri, yakıt karışımı hariç 0.05'ten küçüktür. Giriş faktörlerinin kareleri açısından bakıldığında ise, püskürtme basıncının p değeri hem CO hem de HC için 0.05'ten büyüktür. Diğer parametrelerin p değerleri CO için 0.05'ten küçükken, HC için yakıt karışımının p değeri de 0.05'ten büyüktür. Tablo 7'de verilenlere göre, NO<sub>x</sub> için lineer açıdan giriş faktörlerinin p değerleri püskürtme basıncı hariç 0.05'ten küçük çıkmıştır. İS için ise yakıt karışımı hariç diğer faktörlerin p değerleri 0.05'ten küçüktür. Giriş faktörlerinin karesi açısından bakıldığında ise, NO<sub>x</sub> için tüm faktörlerin karesinin p değerleri 0.05'ten büyük çıkarken, is için sadece yakıt karışımının karesinin p değeri 0.05'ten büyük çıkmıştır. Bir faktörün p değerinin 0.05'ten küçük olması, oluşturulan modelde daha fazla etkiye sahip olduğunun ve daha fazla öneme sahip olduğunun bir göstergesidir [30]. Oluşturulan modellerin değerlendirilmesinde kullanılan diğer parametrelerin dağılımı Tablo 8'de gösterilmektedir. R<sup>2</sup> değeri (belirleme katsayısı), test verilerinin oluşturulan modellere ne derece uyduğunun bir kanıtıdır. 0-1 arasında bir değere sahiptir ve deneylerle uyumun iyiliği ile ilgili bilgi verir. Tüm çıktı parametrelerinin R<sup>2</sup> değerleri, iyi bir uyumun göstergesi olan 0.9 değerinden büyük bir değere sahiptir. Benzer şekilde, oluşturulan modelin doğruluğunu belirten düzeltilmiş R<sup>2</sup> ve tahmin R<sup>2</sup> değerleri de kabul edilebilir düzeyde yüksek çıkmıştır. Modelden elde edilen sonuçlara göre R<sup>2</sup> değerleri Tablo 8'de gösterildiği gibi FEV, EGS, CO, HC, NO<sub>x</sub> ve is için sırasıyla %99.23, %99.91, %99.78, %97.71, %92.56 ve %99.51 olarak bulunmuştur. Çıkış parametreleri olan FEV, EGS, CO, HC, NO<sub>x</sub> ve is emisyonlarının giriş faktörlerine göre ikinci dereceden denklemleri sırasıyla denklem (3), (4), (5), (6), (7) ve (8)'de verilmiştir.

$$FEV = 1,83 + 0,0676 YK + 0,1157 PB + 0,2722 MY - 0,000572 YK * YK - 0,000242 PB * PB - 0,001523 MY * MY - 0,000079 YK * PB - 0,000174 YK * MY - 0,000029 PB * MY \quad (3)$$

$$EGS = 775 + 1,96 YK - 4,89 PB + 0,281 MY + 0,01498 YK * YK + 0,01239 PB * PB + 0,04454 MY * MY - 0,01430 YK * PB + 0,00240 YK * MY - 0,00511 PB * MY \quad (4)$$

$$HC = 105 - 0,721 YK - 0,60 PB - 0,434 MY + 0,00658 YK * YK + 0,00219 PB * PB + 0,01967 MY * MY + 0,00291 YK * PB - 0,00565 YK * MY - 0,00810 PB * MY \quad (5)$$

$$CO = 5,99 - 0,0246 YK - 0,0086 PB - 0,1537 MY + 0,000200 YK * YK + 0,000034 PB * PB + 0,001465 MY * MY + 0,000042 YK * PB + 0,000010 YK * MY - 0,000130 PB * MY \quad (6)$$

$$NO_x = -2401 - 11,0 YK + 23,0 PB + 12,69 MY + 0,1157 YK * YK - 0,0538 PB * PB - 0,0861 MY * MY - 0,0083 YK * PB + 0,1030 YK * MY + 0,0037 PB * MY \quad (7)$$

$$İs = 744,0 - 0,921 YK - 6,468 PB - 0,575 MY + 0,00290 YK * YK + 0,01477 PB * PB + 0,01257 MY * MY + 0,00517 YK * PB - 0,00548 YK * MY - 0,00177 PB * MY \quad (8)$$

Burada; YK, PB ve MY sırasıyla yakıt karışımı, püskürtme basıncı ve motor yükünü ifade etmektedir.

Tablo 5. FEV ve EGS için ANOVA.

Source	FEV			EGS		
	SS	F-değeri	p-değeri	SS	F-değeri	p-değeri
<b>Model</b>	14.1721	152.77	0.000	310768	1255.69	0.000
<b>Lineer</b>						
A- Yakıt karışımı	0.2616	25.38	0.001	788	28.65	0.000
B- Püskürtme basıncı	0.6196	60.11	0.000	2967	107.90	0.000
C- Motor yükü	7.4237	720.21	0.000	282631	10278.03	0.000
<b>Kare</b>						
A <sup>2</sup>	0.2254	21.87	0.001	155	5.63	0.039
B <sup>2</sup>	0.0382	3.70	0.083	100	3.64	0.086
C <sup>2</sup>	3.6936	358.33	0.000	3157	114.82	0.000
<b>Etkileşim</b>						
A*B	0.0077	0.75	0.408	252	9.18	0.013
A*C	0.0586	5.69	0.038	11	0.40	0.539
B*C	0.0019	0.18	0.678	60	2.17	0.172
<b>Hata</b>	0.1031			275		
<b>Toplam</b>	14.2752			311043		

Tablo 6. CO ve HC için ANOVA.

Source	CO			HC		
	SS	F-değeri	p-değeri	SS	F-değeri	p-değeri
<b>Model</b>	17.1573	514.62	0.000	4363.35	74.76	0.000
<b>Lineer</b>						
A- Yakıt karışımı	0.0027	0.74	0.411	2.09	0.32	0.582
B- Püskürtme basıncı	0.0389	10.51	0.009	191.58	29.54	0.000
C- Motor yükü	12.4284	3355.07	0.000	3112.17	479.93	0.000
<b>Kare</b>						
A <sup>2</sup>	0.0277	7.48	0.021	29.88	4.61	0.057
B <sup>2</sup>	0.0007	0.20	0.664	3.13	0.48	0.503
C <sup>2</sup>	3.4160	922.16	0.000	615.58	94.93	0.000
<b>Etkileşim</b>						
A*B	0.0022	0.59	0.461	10.47	1.62	0.233
A*C	0.0002	0.05	0.832	61.58	9.50	0.012
B*C	0.0385	10.39	0.009	149.57	23.06	0.001
<b>Hata</b>	0.0370			64.85		
<b>Toplam</b>	17.1943			4428.20		

Tablo 7. NO<sub>x</sub> ve İs için ANOVA.

Source	NO <sub>x</sub>			İs		
	SS	F-değeri	p-değeri	SS	F-değeri	p-değeri
<b>Model</b>	338367	14.29	0.000	5570.41	226.28	0.000
<b>Lineer</b>						
A- Yakıt karışımı	88559	33.66	0.000	8.15	2.98	0.115
B- Püskürtme basıncı	4210	1.60	0.235	567.46	207.46	0.000



<b>C- Motor yükü</b>	169116	64.27	0.000	4150.05	1517.27	0.000
<b>Kare</b>						
<b>A<sup>2</sup></b>	9234	3.51	0.091	5.81	2.12	0.176
<b>B<sup>2</sup></b>	1886	0.72	0.417	142.30	52.02	0.000
<b>C<sup>2</sup></b>	11796	4.48	0.060	251.29	91.87	0.000
<b>Etkileşim</b>						
<b>A*B</b>	85	0.03	0.861	32.90	12.03	0.006
<b>A*C</b>	20426	7.76	0.019	57.88	21.16	0.001
<b>B*C</b>	31	0.01	0.916	7.12	2.60	0.138
<b>Hata</b>	26312			27.35		
<b>Toplam</b>	364680			5597.77		

*Tablo 8. Modelin değerlendirilmesi.*

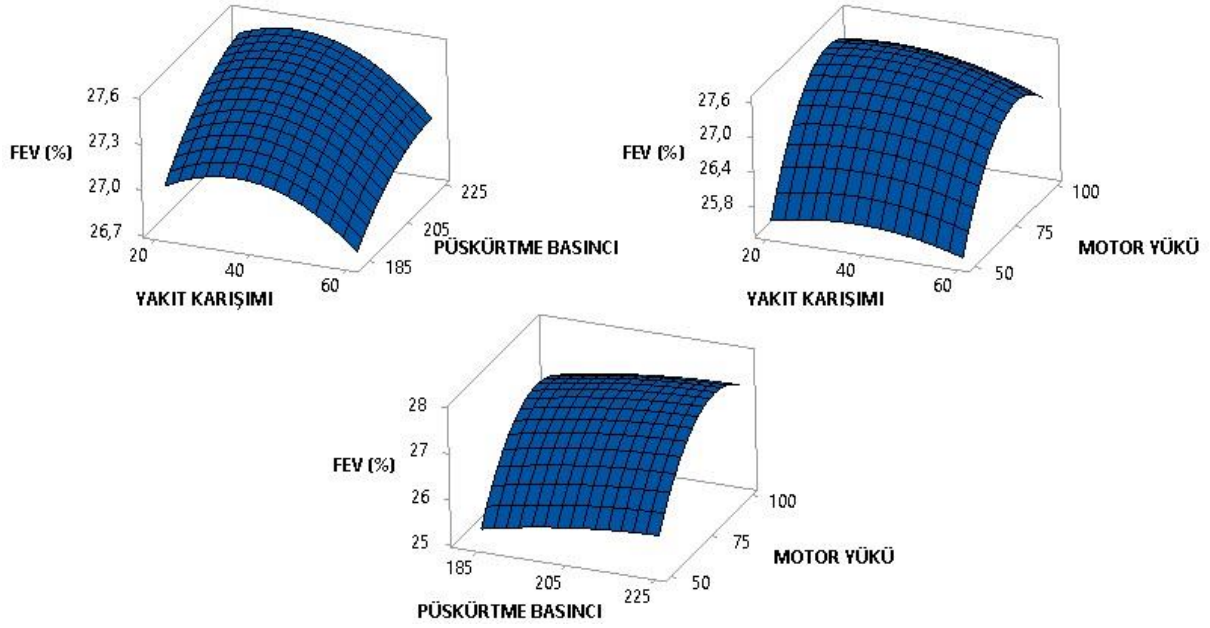
<b>Model</b>	<b>FEV</b>	<b>EGS</b>	<b>CO</b>	<b>HC</b>	<b>NO<sub>x</sub></b>	<b>İs</b>
<b>R<sup>2</sup></b>	99.23	99.91	99.78	97.71	92.56	99.51
<b>Adj. R<sup>2</sup></b>	98.83	99.83	99.66	96.50	88.63	99.07
<b>Pred. R<sup>2</sup></b>	98.14	99.58	99.46	93.84	81.36	97.91

### III. BULGULAR ve TARTIŞMA

Giriş faktörlerinin çıkış parametreleri üzerindeki etkilerini gösteren yüzey grafikleri RSM ile incelenmiştir.

#### *A. FREN EFEKTİF VERİM*

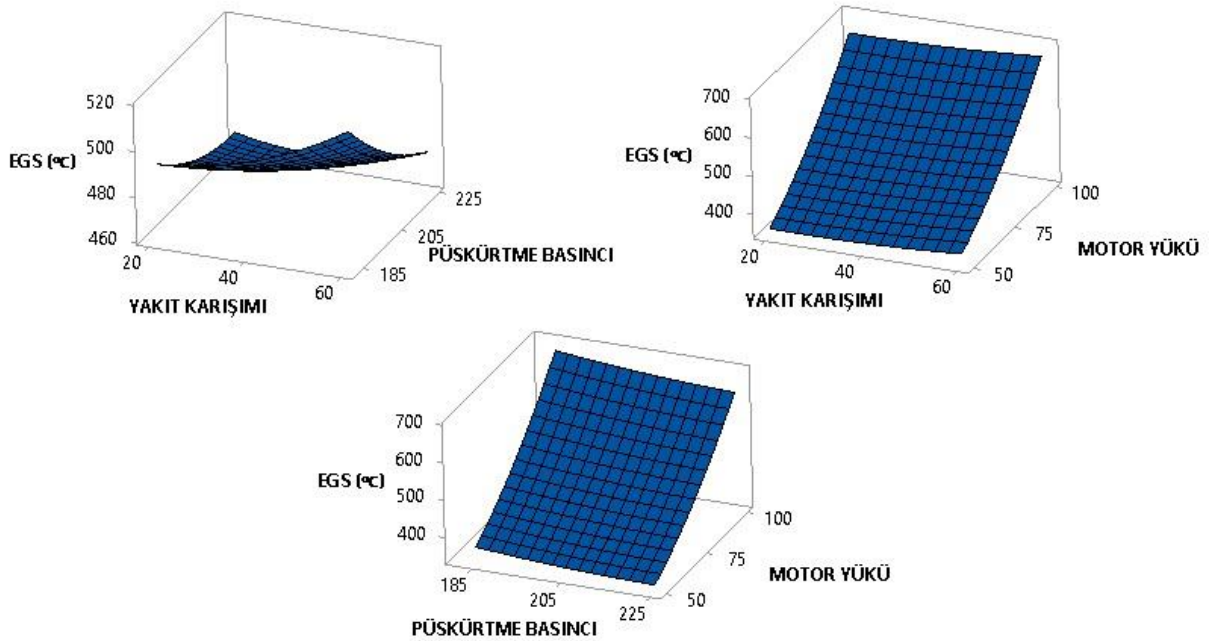
FEV, yakıtın püskürtülmesi ile sunulan enerjinin yüzdesidir ve kullanılan yakıtın özellikleri özellikle alt ısı değerleri FEV için önemlidir [31,32]. ALPY yüzdesi, püskürtme basıncı ve motor yükünün, FEV üzerindeki ortak etkileri Şekil 2’de gösterilmektedir. Grafiklere bakıldığında, FEV değerinin artan karışım oranı ile birlikte arttığı açıkça görülmektedir. Ancak maksimum FEV değerine ulaşıldıktan sonra ALPY oranında herhangi bir artış, FEV değerinin tekrar azalmasına sebep olmaktadır. ALPY’nin ısı değerinin düşük olmasının, FEV değerindeki bu azalmaya sebep olduğu düşünülmektedir [33]. Bu nedenle, FEV değerini maksimize etmek için, karışım oranı optimize edilmelidir. Buna ilaveten, motor yükünün %50 oranından %100’e çıkarılması ile FEV değeri artış göstermiştir. Ancak belirli bir orandan sonra ALPY içeriğinin yaptığı etki gibi olumsuz bir etki yapmıştır. Aynı zamanda, püskürtme basıncının değişimi için de benzer bir durum ortaya çıkmıştır. FEV, 205 bar püskürtme basıncıyla maksimum seviyeye ulaşmış ve ardından artan püskürtme basıncı ile birlikte FEV değeri azalmıştır. Artan püskürtme basıncı ile birlikte yakıtın daha iyi atomize olmasından dolayı FEV artmıştır [28].



Şekil 2. Giriş faktörlerinin FEV üzerindeki ortak etkileri.

### B. EGZOZ GAZ SICAKLIĞI

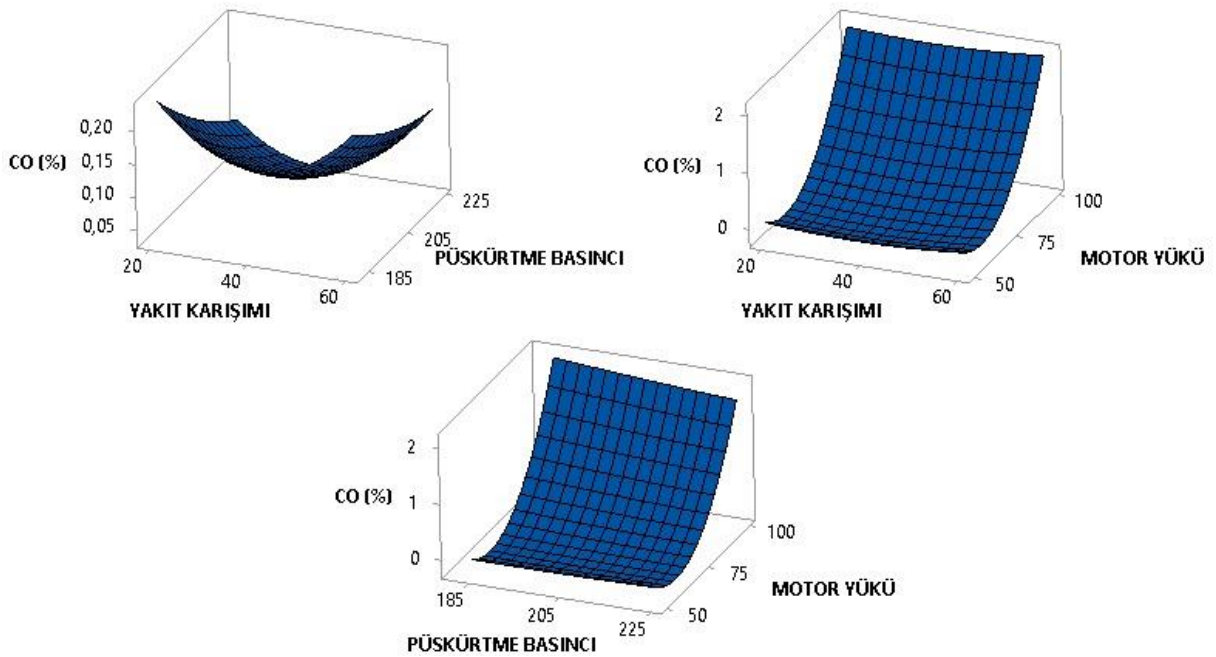
Püskürtme basıncı, motor yükü ve kullanılan yakıtın içerisindeki ALPY oranının EGS üzerindeki ortak etkisi Şekil 3'te gösterilmektedir. Şekilden anlaşılacağı üzere ALPY kullanımı ile EGS artış göstermiştir. ALPY'nin sahip olduğu yüksek sıcaklık salınım oranları, zayıf uçuculuk ve yüksek viskozite bu artışa sebep olmuştur [24]. Diğer taraftan, EGS artan motor yükü ile artış gösterirken, artan püskürtme basıncı ile birlikte azalmıştır. Artan püskürtme basıncı, karışım oluşumunu dolayısıyla da yanmayı hızlandırır [34]. Bu da EGS'nin azalmasına sebep olur.



Şekil 3. Giriş faktörlerinin EGS üzerindeki ortak etkileri.

### C. KARBON MONOKSİT

Püskürtme basıncı, ALPY yüzdesi ve motor yükünün, CO üzerindeki ortak etkileri Şekil 4'te gösterilmektedir. CO emisyonunun yanmamış yakıt mevcudiyetinin ve karışım sıcaklığının bir fonksiyonu olduğu bilinmektedir [35]. Grafiğe bakıldığında, artan ALPY oranı ile CO azalmış ve minimum seviyeye ulaştığı ALPY oranından sonra, ALPY oranındaki en ufak artış CO'nun tekrar artışa geçmesine sebep olmuştur. Artan püskürtme basıncı ile birlikte CO azalmış ancak oluşan eğriye bakılınca 225 bardan sonra tekrar artışa geçeceği düşünülmektedir. Diğer taraftan artan motor yükü ile birlikte CO değeri artış göstermiştir. Artan motor devri ile birlikte silindir içi sıcaklık arttığı için CO emisyonunun da arttığı tahmin edilmektedir. CO emisyonlarını etkileyen ana etken hava-yakıt karışımının düzgünlüğüdür. ALPY'nin alt ısıl değeri düşük olduğu için hava-yakıt karışımının daha iyi olmasını sağladığı ve CO emisyonlarını azalttığı düşünülmektedir. Ancak optimum ALPY oranından sonra CO emisyonları tekrar artışa geçmiştir. ALPY'nin geleneksel dizel yakıt ile oluşturulan karışım içerisindeki oranının yüksek olmasından dolayı karışımın viskozite değeri oldukça düşmektedir. Buna ilaveten, setan sayısı da çok fazla artarak yakıtın daha geç tutuşmasına ve dolayısıyla yanma için yeterli zamanın olmamasına sebep olmaktadır. Ayrıca ALPY'nin uçuculuğu nispeten düşük olmasının da buna neden olduğu düşünülmektedir. Yanma işlemi sırasında, atomizasyon işlemini etkileyen düşük moleküler ağırlıklı bileşiklerin varlığı, daha yüksek CO emisyonlarına sebep olmaktadır [24].

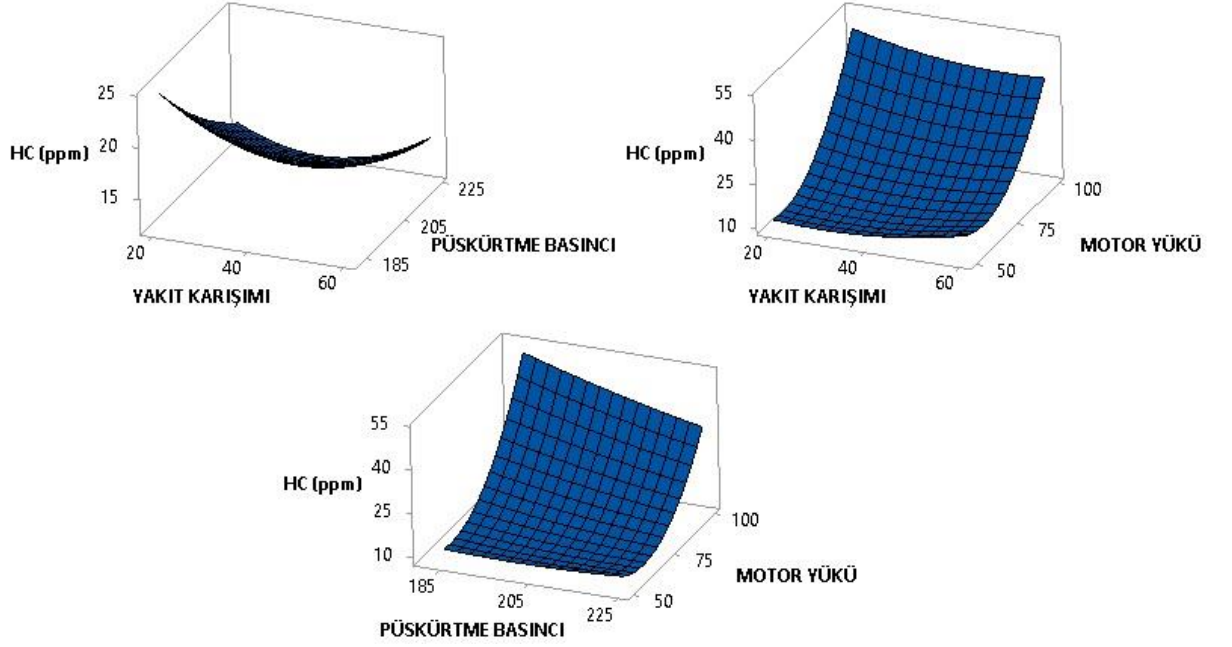


Şekil 4. Giriş faktörlerinin CO üzerindeki ortak etkileri.

### D. HİDROKARBON

Şekil 5'te ALPY yüzdesi, püskürtme basıncı ve motor yükünün HC emisyonuna ortak etkileri gösterilmektedir. HC emisyonları, hava / yakıt karışımının çok fakir veya çok zengin olduğu silindirin bazı bölgelerinde ortaya çıkan eksik yanmadan dolayı yakıt moleküllerinden oluşan sıcaklığın bir fonksiyonudur [36]. Grafiğe bakıldığında, artan ALPY oranı ile ortalama karışım oranına kadar HC'nin azaldığı açıkça görülmektedir. Minimum seviyeye ulaştıktan sonra ALPY ilavesiyle, HC yeniden artmaya başlamıştır. Motor yükünün HC emisyonuna olan etkisi CO emisyonuna olan etki ile benzerdir. Artan motor yükü HC emisyonlarının artmasına sebep olmuştur. Yakıt karışımındaki ALPY

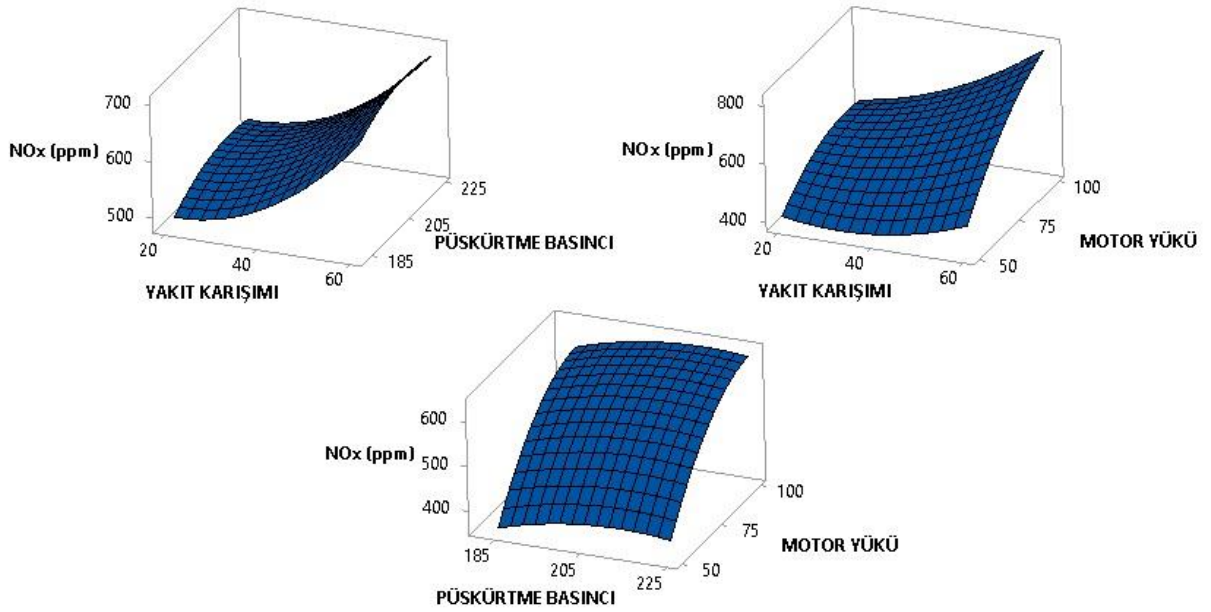
yakıtın uçuculuğunu artırır ve yakıtın viskozitesini düşürür, bu da HC emisyonlarını azaltıcı etki yapmaktadır. Bununla birlikte, ortalama orandan sonra, ALPY'nin yüksek aromatik içeriğinden dolayı HC emisyonu tekrar artmaya başlar. ALPY yakıtı daha fazla aromatik maddeye sahiptir ve yüksek aromatik yakıtlar HC emisyonlarında bir artışa neden olurlar [37].



Şekil 5. Giriş faktörlerinin HC üzerindeki ortak etkileri.

#### E. AZOT OKSİTLER

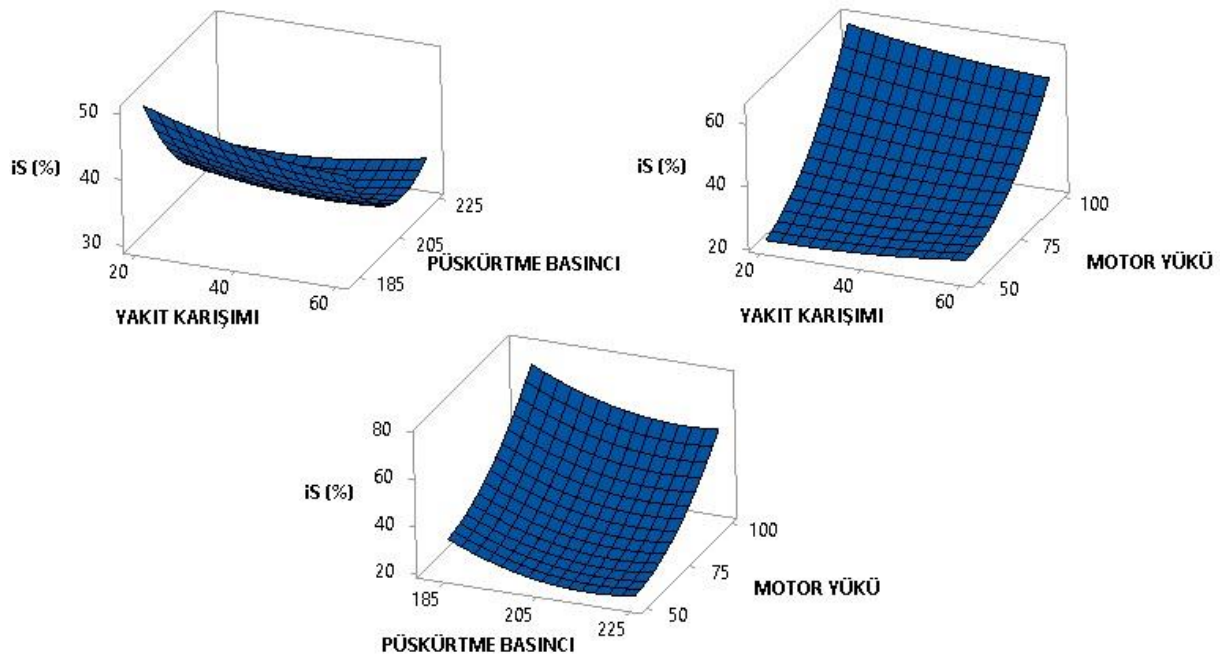
$NO_x$  emisyonu oluşumu, oksijen konsantrasyonuna ve yanmış gazların maksimum sıcaklığına büyük ölçüde bağlıdır [38].  $NO_x$  emisyonuna ALPY oranı, püskürtme basıncı ve motor yükünün ortak etkilerini içeren grafikler Şekil 6'da gösterilmektedir. Motor yükünün, püskürtme basıncının ve yakıt karışım oranının artması ile  $NO_x$  emisyonlarının arttığı açıkça görülmektedir. ALPY kullanımı ile  $NO_x$  emisyonunun artması, yakıtın yoğunluğunun ve aromatik içeriğinin yüksek olmasından dolayı olduğu düşünülmektedir [37]. Ek olarak, motor yükü artması ile birlikte silindir içi sıcaklık arttığı için  $NO_x$  emisyonları da artmıştır.



Şekil 6. Giriş faktörlerinin  $NO_x$  üzerindeki ortak etkileri.

#### F. İS EMİSYONU

Şekil 7’de yakıt karışım oranı, motor yükü ve püskürtme basıncının ortak etkisi üç boyutlu olarak gösterilmektedir. Şekle bakıldığında, %40 ALPY oranına kadar is emisyonlarının azaldığı görülmektedir. ALPY’nin %40’tan fazla artırılması yüksek aromatik içeriğinden dolayı is emisyonlarının tekrar artmasına sebep olmuştur. Diğer taraftan artan püskürtme basıncı is emisyonlarını azaltırken, motor yükünün artması, is emisyonlarının artmasına sebep olmuştur. Püskürtme basıncının artması atomizasyonu ve dolayısıyla da yanmayı iyileştirmiş ve is emisyonlarını azaltmıştır [39].



Şekil 7. Giriş faktörlerinin İs üzerindeki ortak etkileri.

## IV. OPTİMİZASYON VE DOĞRULAMA

### A. OPTİMİZASYON

Bu çalışmada, çoklu hedefler için motor faktörlerini optimize etmek adına RSM analizinin içerisinde bulunan yanıt optimizatörü (response optimizer) kullanılmıştır. Buradaki asıl amaç, egzoz emisyonlarını minimum seviyede tutarken performans parametrelerini iyileştirmektir. Bu nedenle, FEV değerini maksimum ve emisyon seviyelerini minimum yaparak optimize etmek istenmektedir. Şekil 8’de RSM optimizatörünün çıktı değerleri gösterilmektedir. %30.51 yakıt karışım oranı, 225 bar püskürtme basıncı ve %62.12 motor yükü optimum giriş parametrelerinde, FEV, EGS, CO, HC, NO<sub>x</sub> ve is için optimum değerler sırasıyla, %26.89, 399.31 °C, %0.19, 9.09 ppm, 474.73 ppm ve %24.40 olarak bulunmuştur. Böylelikle RSM, test edilen değerler arasındaki en iyi motor çalışma faktörlerini tahmin etmek ve belirlemek için kullanılabilir. Bu yöntemler hem zamanı hem de parayı koruyarak test sayısını önemli ölçüde azaltır.

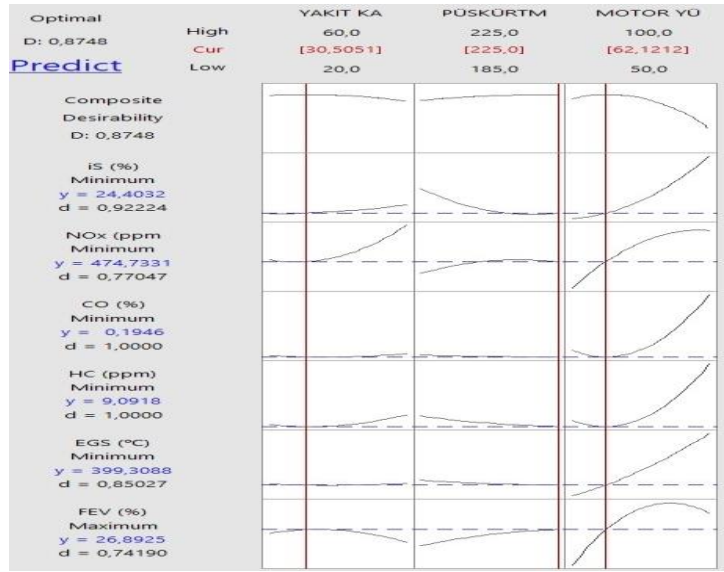
### B. DOĞRULAMA

Optimizasyon ilkeleri Tablo 9’da gösterilmektedir. Optimizasyonun amacı, en yüksek FEV ile aynı anda EGS, CO, HC, NO<sub>x</sub> ve is emisyonlarının azaltılmasıdır. Tablo 10’da gösterildiği gibi FEV, EGS, CO, HC, NO<sub>x</sub> ve is için optimum değerler sırasıyla, %26.89, 399.31 °C, %0.19, 9.09 ppm, 474.73 ppm ve %24.40 olarak %30.51 yakıt karışım oranı, 225 bar püskürtme basıncı ve %62.12 motor yükü optimum giriş parametrelerinde bulunmuştur. Ortalama hatalar FEV, EGS, CO, HC, NO<sub>x</sub> ve is için sırasıyla %1.55, %2.13, %8.33, %9.62, %4.95 ve %6.28 olarak uygun hata seviyeleri aralığında elde edilmiştir.

**Tablo 9.** Optimizasyon ilkeleri.

Faktör	Sınırlar		Ağırlık	Önem	Kriter
	Alt sınır	Üst sınır			
Yakıt karışımı (%)	20	40	1	1	Aralığında
P. basıncı (bar)	185	225	1	1	Aralığında
Motor yükü (%)	50	100	1	1	Aralığında
FEV (%)	25.06	27.53	1	1	Maksimuma çıkarmak
EGS (°C)	349	685	1	1	Minimuma düşürmek
CO (%)	0.05	2.24	1	1	Minimuma düşürmek
HC (ppm)	11	58	1	1	Minimuma düşürmek
NO <sub>x</sub> (ppm)	354	880	1	1	Minimuma düşürmek
İs (%)	19.8	74	1	1	Minimuma düşürmek





Şekil 8. FEV, EGS, CO, HC, NO<sub>x</sub> ve is için optimizasyon grafiği.

Tablo 10. Tahmin edilen ve deneysel değerler için doğrulama testleri.

Yakıt Karışımı (%)	Motor Yükü (%)	Püskürtme Basıncı (bar)	Değer	FEV (%)	EGS (°C)	CO (%)	HC (ppm)	NO <sub>x</sub> (ppm)	İs (%)
30.505	62.121	225	Tahmin	26.892	399.31	0.195	9.092	474.733	24.403
			Test	26.48	408	0.18	10.06	499.44	26.04
			Hata (%)	1.55	2.13	8.33	9.62	4.95	6.28

## V. SONUÇ

Bu çalışmada ALPY / dizel karışımının, püskürtme basıncının ve motor yükünün, motor performansı ve egzoz emisyonları üzerindeki etkileri RSM kullanılarak analiz edilmiştir. Deneyler tek silindri bir dizel motorda, farklı motor yüklerinde ve farklı yakıt püskürtme basınçlarında ALPY/dizel karışımları kullanılarak gerçekleştirildi. FEV, EGS, CO, HC, NO<sub>x</sub> ve is'i etkileyen çeşitli parametrelerin etkisini belirlemek için bir ANOVA çalışması ve bu çıkış parametrelerinin tahmini için RSM uygulanmıştır. Elde edilen R<sup>2</sup> değerleri FEV, EGS, CO, HC, NO<sub>x</sub> ve is için sırasıyla %99.23, %99.91, %99.78, %97.71, %92.56 ve %99.51 olarak bulunmuştur ve bu değerler, oluşturulan modelin test sonuçlarına yakın sonuçlar verdiğini göstermektedir. Buna ilaveten, tahminsel ve deneysel sonuçların doğrulanması için doğrulama testleri yapılmıştır. Ortalama hatalar FEV, EGS, CO, HC, NO<sub>x</sub> ve is için sırasıyla %1.55, %2.13, %8.33, %9.62, %4.95 ve %6.28 olarak uygun hata seviyeleri aralığında elde edilmiştir. Ayrıca, çalışma faktörlerinin optimum değerlerini belirlemek amacıyla RSM optimizasyonu yapılmıştır. Optimizasyon sonuçlarına göre, çıkış parametreleri için en iyi sonuçlar yine sırasıyla, %26.89, 399.31 °C, %0.19, 9.09 ppm, 474.73 ppm ve %24.40 olarak, optimum çalışma parametreleri olarak tespit edilen %30.51 yakıt karışım oranı, 225 bar püskürtme basıncı ve %62.12 motor yükü değerlerinde elde edilmiştir. Bu bağlamda, motor performansı ve emisyon parametrelerini optimize etmek ve optimum motor çalışma faktörlerini belirlemek için RSM modellerinin başarıyla gerçekleştirilebileceği sonucuna varılabilir. Bu çalışmanın, motor geliştiricileri ve araştırmacılar için minimum test sayısı ile gelişmiş motor performansı ve emisyon için en iyi faktörleri tahmin etmelerine yardımcı olacağı düşünülmektedir.

## VI. KAYNAKLAR

- [1] M. Ebrahimi and S. A. Jazayeri, "Effect of hydrogen addition on RCCI combustion of a heavy duty diesel engine fueled with landfill gas and diesel oil", *International Journal Of Hydrogen Energy*, vol. 44, s. 14, pp. 7607–7615, 2019.
- [2] K. S. S. Y. Rao and B. B. Krishna, "Modeling diesel engine fueled with tamanu oil - Diesel blend by hybridizing neural network with firefly algorithm", *Renewable Energy*, vol 134, pp. 1200–1212, 2019.
- [3] Ü. Ağbulut and S. Sarıdemir, "A general view to converting fossil fuels to cleaner energy source by adding nanoparticles", *International Journal Of Ambient Energy*, pp. 1–6, 2019.
- [4] Ü. Ağbulut, "Turkey's electricity generation problem and nuclear energy policy", *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, And Environmental Effects*, pp. 2281–2298, 2019.
- [5] G. Ospina, M. Selim, S. Omari, M. Ali and A. Hussien, "Engine roughness and exhaust emissions of a diesel engine fueled with three biofuels", *Renewable Energy*, vol. 134, pp. 1465–1472, 2019.
- [6] Ü. Ağbulut and H. Bakır, "The Investigation on Economic and Ecological Impacts of Tendency to Electric Vehicles Instead of Internal Combustion Engines", *Duzce University Journal Of Science And Technology*, vol. 7, s. 1, pp. 25–36, 2019.
- [7] M. A. Asokan, S. S. Prabu, P. K. K. Bade, V. M. Nekkanti and S. S. G. Gutta, "Performance, combustion and emission characteristics of juliflora biodiesel fuelled DI diesel engine", *Energy*, vol. 173, pp. 883–892, 2019.
- [8] U. Rajak, P. Nashine and T. N. Verma, "Assessment of diesel engine performance using spirulina microalgae biodiesel", *Energy*, vol. 166, pp. 1025–1036, 2019.
- [9] A. Hasan and I. Dincer, "Comparative assessment of various gasification fuels with waste tires for hydrogen production", *International Journal Of Hydrogen Energy*, 2019.
- [10] U. Z. Baskovic, R. Vihar, T. Seljak and T. Katrasnik, "Feasibility analysis of 100% tire pyrolysis oil in a common rail Diesel engine", *Energy*, vol. 137, pp. 980–990, 2017.
- [11] R. Vihar, T. Seljak, S. R. Opresnik and T. Katrasnik, "Combustion characteristics of tire pyrolysis oil in turbo charged compression ignition engine", *Fuel*, vol. 150, pp. 226–235, 2015.
- [12] S. Uslu and M. B. Celik, "Prediction of engine emissions and performance with artificial neural networks in a single cylinder diesel engine using diethyl ether", *Engineering Science And Technology, An International Journal*, pp. 0–7, 2018.
- [13] K. P. Singh, S. Gupta, A. K. Singh and S. Sinha, "Optimizing adsorption of crystal violet dye from water by magnetic nanocomposite using response surface modeling approach", *Journal Of*



*Hazardous Materials*, vol. 186, s. 2–3, pp. 1462–1473, 2011.

[14] C. Esonye, O. D. Onukwuli and A. U. Ofoefule, "Optimization of methyl ester production from Prunus Amygdalus seed oil using response surface methodology and Artificial Neural Networks", *Renew. Energy*, vol. 130, pp. 61–72, 2019.

[15] W. Subramonian, T. Y. Wu and S. P. Chai, "An application of response surface methodology for optimizing coagulation process of raw industrial effluent using Cassia obtusifolia seed gum together with alum", *Industrial Crops & Products*, vol. 70, pp. 107–115, 2015.

[16] Y. Singh, A. Sharma, S. Tiwari and A. Singla, "Optimization of diesel engine performance and emission parameters employing cassia tora methyl esters-response surface methodology approach", *Energy*, vol. 168, pp. 909–918, 2019.

[17] G. Khoobakht, M. Karimi and K. Kheiralipour, "Effects of biodiesel-ethanol-diesel blends on the performance indicators of a diesel engine: A study by response surface modeling", *Applied Thermal Engineering*, vol. 148, pp. 1385–1394, 2019.

[18] V. S. Yaliwal, N. R. Banapurmath, V. N. Gaitonde and M. D. Malipatil, "Simultaneous optimization of multiple operating engine parameters of a biodiesel-producer gas operated compression ignition (CI) engine coupled with hydrogen using response surface methodology", *Renewable Energy*, vol. 139, pp. 944–959, 2019.

[19] R. Sakthivel, K. Ramesh, S. J. J. Marshal and K. K. Sadasivuni, "Prediction of performance and emission characteristics of diesel engine fuelled with waste biomass pyrolysis oil using response surface methodology", *Renewable Energy*, vol. 136, pp. 91–103, 2019.

[20] M. G. Nayak and A. P. Vyas, "Optimization of microwave-assisted biodiesel production from Papaya oil using response surface methodology", *Renewable Energy*, vol. 138, pp. 18–28, 2019.

[21] V. Krishnamoorthy, R. Dhanasekaran, D. Rana, S. Saravanan and B. R. Kumar, "A comparative assessment of ternary blends of three bio-alcohols with waste cooking oil and diesel for optimum emissions and performance in a CI engine using response surface methodology", *Energy Conversion And Management*, vol. 156, pp. 337–357, 2018.

[22] D. Oğuzhan, "The experimental investigation of utilization of scrap tire derived pyrolytic fuel in a diesel engine", 2012.

[23] E. R. Umeki, C. F. de Oliveira, R. B. Torres and R. G. dos Santos, "Physico-chemistry properties of fuel blends composed of diesel and tire pyrolysis oil", *Fuel*, vol. 185, pp. 236–242, 2016.

[24] S. Murugan, M. C. Ramaswamy and G. Nagarajan, "The use of tyre pyrolysis oil in diesel engines", *Waste Management*, vol. 28, s. 12, pp. 2743–2749, 2008.

[25] Y. Kobashi, S. Hirako, A. Matsumoto and K. Naganuma, "Flash boiling spray of diesel fuel mixed with ethane and its effects on premixed diesel combustion", *Fuel*, vol. 237, pp. 686–693, 2019.

[26] R. Vihar, U. Z. Baskovic, T. Seljak and T. Katrasnik, "Combustion and emission formation

phenomena of tire pyrolysis oil in a common rail Diesel engine", *Energy Conversion And Management*, vol. 149, pp. 706–721, 2017.

[27] S. Kumar and P. Dinesha, "Optimization of engine parameters in a bio diesel engine run with honge methyl ester using response surface methodology", *Measurement*, vol. 125, pp. 224–231, 2018.

[28] Y. Singh, A. Sharma, G. K. Singh, A. Singla and N. K. Singh, "Optimization of performance and emission parameters of direct injection diesel engine fuelled with pongamia methyl esters-response surface methodology approach", *Industrial Crops & Products*, vol. 126, pp. 218–226, 2018.

[29] "Minitab Statistical Software", .

[30] L. V. Candiotti, M. M. De Zan, M. S. Camara and H. C. Goicoechea, "Experimental design and multiple response optimization. Using the desirability function in analytical methods development", *Talanta*, vol. 124, pp. 123–138, 2014.

[31] S. Patel, A. K. Azad and M. Khan, "Numerical investigation for predicting diesel engine performance and emission using different fuels", *Energy Procedia*, vol. 160, pp. 834–841, 2019.

[32] S. Jaichandar and K. Annamalai, "Effects of open combustion chamber geometries on the performance of pongamia biodiesel in a DI diesel engine", *Fuel*, vol. 98, pp. 272–279, 2012.

[33] P. Shivakumar and B. R. Shrinivasa, "Artificial Neural Network based prediction of performance and emission characteristics of a variable compression ratio CI engine using WCO as a biodiesel at different injection timings", *Applied Energy*, vol. 88, s. 7, pp. 2344–2354, 2011.

[34] V. S. Hariharan and K. V. Reddy, "Effect of Injection Pressure on Diesel Engine Performance with Sea Lemon Oil", *Indian Journal Of Science And Technology*, vol. 4, s. 8, 2011.

[35] A. Sharma and S. Murugan, "Potential for using a tyre pyrolysis oil-biodiesel blend in a diesel engine at different compression ratios", *Energy Conversion And Management*, vol. 93, pp. 289–297, 2015.

[36] S. Uslu and M. B. Celik, "Experimental investigation of the effects of diethyl ether- diesel fuel blends on engine parameters in a low power diesel engine", *International Journal Of Engineering Sciences & Research Technology*, vol. 7, s. 5, pp. 1–13, 2018.

[37] S. Frigo, M. Seggiani, M. Puccini and S. Vitolo, "Liquid fuel production from waste tyre pyrolysis and its utilisation in a Diesel engine", *Fuel*, vol. 116, pp. 399–408, 2014.

[38] S. M. Palash, M. A. Kalam, H. H. Masjuki, B. M. Masum, I. M. Rizwanul Fattah and M. Mofijur, "Impacts of biodiesel combustion on NOx emissions and their reduction approaches", *Renewable And Sustainable Energy Reviews*, vol. 23, pp. 473–490, 2013.

[39] R. Raghu and G. Ramadoss, "Optimization of injection timing and injection pressure of a DI diesel engine fueled with preheated rice bran oil", *International Journal Of Energy and Environment*, vol. 2, s. 4, pp. 661–670, 2011.