

# Investigating Engine Performance and Emission Characteristics during Testing of Diesel-Biodiesel Mixed Fuels Obtained from Vegetable Oils and their Modeling

S. R. Mousavi Seyedi<sup>1</sup>, M. Askari<sup>1\*</sup>, S. M. R. Miri<sup>2</sup>

1- Mechanics of Biosystem Engineering Department, Sari Agricultural Sciences & Natural Resources University, Sari, Iran

2- Department of Biosystems Engineering, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

(\*- Corresponding Author Email: [m.askari@sanru.ac.ir](mailto:m.askari@sanru.ac.ir))

<https://doi.org/10.22067/jam.2024.88750.1263>

## Introduction

In Asia, two-wheeled agricultural tractors predominantly use single-cylinder two-stroke diesel engines, which are characterized by high fuel consumption and substantial air pollution. At the same time, the severe environmental impacts of energy production from diminishing fossil fuel reserves are increasingly evident. Therefore, it is essential to develop sustainable and clean energy sources to meet these needs. Biodiesel is an alternative fuel that can be blended with conventional diesel to help reduce environmental pollution. In this study, diesel-biodiesel blends produced from rapeseed, soybean, and palm oil were evaluated for their effects on engine performance metrics, including power (P), torque (T), and specific fuel consumption (SFC). Furthermore, the emissions of pollutants (NO<sub>x</sub>, HC, CO, and CO<sub>2</sub>) from these fuels were measured and modeled using linear and non-linear regression, as well as the adaptive neuro-fuzzy inference system (ANFIS).

## Materials and Methods

To leverage the benefits of palm oil biodiesel, known for its high calorific value, along with the low kinematic viscosity of biodiesel derived from soybean and rapeseed oils, pure diesel was blended with 10% and 20% mixtures of rapeseed, soybean, and palm biodiesel, as well as 10% and 20% combinations of all three biodiesels. These nine fuel blends were tested at four engine speeds (1800, 2100, 2400, and 2700 rpm) under full load conditions. The diesel-biodiesel blends were produced at Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University (SANRU) and transported to the engine laboratory at Tarbiat Modares University in Tehran, Iran, for detailed analysis. A total of 36 treatments were evaluated using a randomized complete block design (RCBD), incorporating four engine speeds and nine fuel types. The measured outputs included engine power, torque, specific fuel consumption, and pollutant emissions such as NO<sub>x</sub>, HC, CO, and CO<sub>2</sub>. The collected data were used as input for modeling through both linear and non-linear regression in SPSS software, as well as ANFIS in MATLAB software.

## Results and Discussion

This study evaluated nine diesel-biodiesel blends derived from palm, rapeseed, and soybean oils using a diesel engine in a controlled laboratory setting. Tests were carried out at four engine speeds—1800, 2100, 2400, and 2700 rpm—under full load conditions to assess engine performance and exhaust emissions. The results showed that for all tested fuel blends, power, specific fuel consumption, and pollutant emissions increased with engine speed, while torque decreased. Based on the findings, a blend containing 20% palm biodiesel can be used as an alternative fuel in diesel engines without requiring any modifications. The modeling results indicated that non-linear regression provided better accuracy than linear regression. However, ANFIS demonstrated a much higher correlation between actual and predicted values, with R<sup>2</sup> exceeding 0.98 for both performance parameters and emissions, compared to R<sup>2</sup> values below 0.47 for linear regression and below 0.92 for non-linear regression. The ANFIS model achieved its highest and lowest R<sup>2</sup> values at 0.99 for specific fuel consumption (SFC) and 0.98 for power (P), respectively; substantially higher than those from linear regression, which yielded 0.47 for torque (T) and 0.00 for power. Non-linear regression resulted in R<sup>2</sup> values of 0.92 for SFC and 0.60 for carbon monoxide (CO), still lower than those achieved by ANFIS. Overall, the highest R<sup>2</sup> value recorded was 0.7525 for torque, and the lowest was 0.6112 for power.

## Conclusion

Single-cylinder diesel engines, which have high fuel consumption and contribute to air pollution, are commonly used in two-wheel agricultural tractors across Asia. One approach to reducing the environmental impact of fossil fuels is to use biodiesel in these engines without requiring any modifications. The results of this study

showed that a 20% blend of palm biodiesel can be an effective alternative fuel for diesel engines, with no need for engine modification. Furthermore, the modeling results indicated a significantly higher correlation ( $R^2 > 0.98$ ) between actual and predicted values of performance variables and emissions using ANFIS, compared to linear regression ( $R^2 < 0.47$ ) and non-linear regression ( $R^2 < 0.92$ ). Therefore, ANFIS can be effectively used to accurately predict engine performance and emission parameters.

**Keywords:** ANFIS, Engine efficiency, Palm oil, Rapeseed oil, Soybean oil

# بررسی ویژگی‌های عملکرد و آلاینده‌گی موتور حین آزمون سوخت‌های ترکیبی دیزل- بیودیزل حاصل از روغن‌های گیاهی و مدل‌سازی آن‌ها

سیدرضا موسوی سیدی<sup>۱</sup>، محمد عسکری<sup>۱\*</sup>، سید محمدرضا میری<sup>۲</sup>

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۴/۱۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۶/۱۸

## چکیده

در این تحقیق، پس از تولید سوخت‌های ترکیبی دیزل- بیودیزل روغن گیاهان کلزا، سویا و پالم، تأثیر آن‌ها بر عملکرد موتور (توان، گشتاور و مصرف سوخت ویژه) و آلاینده‌های خروجی ( $CO_2$ ،  $CO$ ،  $HC$ ،  $NO_x$ ) مدل‌سازی شد. دیزل خالص به همراه مخلوط‌های ۱۰ و ۲۰ درصد بیودیزل کلزا، سویا و پالم و مخلوط ۱۰ و ۲۰ درصد از ۳ بیودیزل مذکور در ۴ سرعت (۱۸۰۰، ۲۱۰۰، ۲۴۰۰ و ۲۷۰۰ دور بر دقیقه) تحت شرایط بار کامل موتور آزمایش شدند. داده‌ها به‌عنوان ورودی روش‌های مدل‌سازی رگرسیون خطی، غیرخطی و سیستم استنتاج فازی- عصبی تطبیقی (انفیس) استفاده شدند. نتایج نشان داد که در همه سوخت‌های ترکیبی مقادیر توان، مصرف سوخت ویژه و تمامی آلاینده‌ها با افزایش سرعت موتور، افزایش اما گشتاور کاهش یافت. سوخت ترکیبی بیودیزل پالم ۲۰ درصد می‌تواند به‌عنوان سوخت جایگزین در موتورهای دیزلی بدون تغییر موتور استفاده شود. رگرسیون غیرخطی دقیق‌تر از نوع خطی بوده همچنین بین مقادیر واقعی و پیش‌بینی شده متغیرهای عملکرد و آلاینده‌گی موتور توسط انفیس، همبستگی بسیار بالاتری (ضریب تبیین بیشتر از ۰/۹۸) در قیاس با رگرسیون خطی (ضریب تبیین کمتر از ۰/۴۷) و غیرخطی (ضریب تبیین کمتر از ۰/۹۲) وجود دارد. بیشترین کمترین ضرایب تبیین در معادلات ارائه‌شده توسط انفیس مربوط به پارامترهای SFC و P به ترتیب به میزان ۰/۹۹ و ۰/۹۸ است که بسیار بیشتر از ضرایب تبیین پیشینه و کمینه در معادلات رگرسیون خطی (۰/۴۷) و ۰/۱۰۰ به ترتیب مربوط به T و P) و غیرخطی (۰/۹۲) و ۰/۶۰ به ترتیب مربوط به SFC و CO) است.

واژه‌های کلیدی: انفیس، بازدهی موتور، روغن پالم، روغن سویا، روغن کلزا

## مقدمه

دیزلی خود به‌عنوان یک منبع توان شناخته‌شده در تراکتورهای دو چرخ (تیلر کشاورزی)، مورد استفاده قرار می‌گیرند. جایگزینی سوخت‌های تجدیدپذیر مانند بیودیزل با سوخت دیزل در این موتورها، یک انتخاب در دسترس برای کاهش ناامنی انرژی و اثرات مضر استفاده از سوخت‌های فسیلی می‌باشد (Menacer & Bouchetara, 2014). بیودیزل به‌عنوان یک سوخت کمکی برای اختلاط با سوخت دیزل محبوبیت زیادی پیدا کرده است، زیرا سوختی پاک، تجدیدپذیر، زیست‌تخریب‌پذیر، سازگار با محیط‌زیست و غیرسمی است و می‌توان آن را به هر نسبتی با دیزل مخلوط کرد (Al-Dawudy, 2017). در زمینه عملکرد و آلاینده‌گی سوخت بیودیزل ترکیب‌شده با دیزل تحقیقات زیادی انجام شده است. در پژوهشی، ویژگی‌های عملکرد و آلاینده‌گی ترکیبات سوخت بیودیزل حاصل از پلی اندرا به میزان ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد حجمی و دیزل خالص روی یک موتور دیزل شش سیلندر در سرعت‌های مختلف تحت بار کامل مورد بررسی قرار گرفت.

به‌تازگی، مشکلات قابل توجهی از جمله افزایش شدید تقاضا و قیمت جهانی، کمبود عرضه، تجدیدنپذیری و آلودگی محیط‌زیست در نتیجه استفاده از سوخت‌های رو به اتمام فسیلی که حدود ۸۰ درصد انرژی مورد نیاز جهان را تأمین می‌کنند، به‌وجود آمده است. این امر محققان را بر آن داشته است تا به دنبال سوخت پاک جایگزینی بوده که با توسعه پایدار، حفظ و مدیریت و بهره‌وری انرژی و تغییرات آب و هوایی رابطه هم‌زیستی داشته باشد (Al-Dawody, Jazie, & Abdulkadhim Abbas, 2019). از طرفی موتورهای تک‌سیلندر با چرخه دو زمانه یکی از انواع موتورهای درون‌سوز بوده و پتانسیل تولید توان دو برابر موتورهای چهار زمانه مشابه خود را دارند. این موتورها همچنان به خاطر طراحی ساده، وزن سبک با قابلیت روشن شدن سریع در دمای پایین و هزینه به نسبت کم، مورد تقاضا بوده و در نوع

ایران

۱- گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده مهندسی زراعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران

(\*)- نویسنده مسئول:

(Email: m.askari@sanru.ac.ir

<https://doi.org/10.22067/jam.2024.88750.1263>

۲- گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد،

شش مجموعه از مخلوط دیزل و بیودیزل جاتروفا، کارانجا، ماهوآ و پنبه با درصد حجمی ۱۰ و ۹۰ درصد روی یک موتور دیزل تک‌سیلندر به روش شبکه عصبی مصنوعی تحت بارگذاری کامل را مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج نشان داد که کاهش در ویژگی‌های عملکردی راندمان حرارتی و بازده حجمی از ۰/۷۷ تا ۵/۶ درصد متغیر است. در مصرف سوخت ویژه کاهش قابل توجه ۸/۹۱ درصد مشاهده شد. ویژگی‌های احتراقی مخلوط‌های بیودیزل مشابه سوخت دیزل به دست آمد. از طرفی کاهش کلی در آلایندگی CO به مقدار ۳۴/۰۵ و افزایش ۴۲/۵۴ درصد در آلایندگی CO<sub>2</sub> برای همه مخلوط‌ها مشاهده شد.

در تحقیقی دیگر، ویژگی‌های آلایندگی یک موتور دیزل تک‌سیلندر با مخلوط بیودیزل جاتروفا حاوی ۳۰ درصد حجمی در ترکیب با دیزل به روش سطح پاسخ تحت نسبت تراکم‌های مختلف مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که مخلوط B30، آلایندگی‌های HC و CO را به ترتیب در حدود ۱۶/۷ و ۲۴ درصد در مقایسه با دیزل خالص کاهش داد. با این حال افزایش قابل توجهی در میزان آلایندگی‌های NO<sub>x</sub> و CO<sub>2</sub> ثبت شد. از طرفی با افزایش بار و نسبت تراکم، آلایندگی‌های HC و CO به طور قابل توجهی کاهش، اما CO<sub>2</sub> و NO<sub>x</sub> افزایش یافتند (Singh et al., 2021). در بسیاری از پژوهش‌های مدل‌سازی، بیشتر از نوع خطی و بسیار کم از نوع غیرخطی روش رگرسیون به عنوان در دسترس‌ترین نوع مدل‌سازی در مقام مقایسه با سایر روش‌های کامپیوتری مانند شبکه عصبی مصنوعی، منطق فازی، انقبس و روش سطح پاسخ استفاده شده است (Sayed et al., 2021).

تاکنون، آزمون ویژگی‌های عملکردی و آلایندگی موتور جین استفاده از مخلوط دیزل-بیودیزل حاصل از گیاهان کلزا، سویا و پالم به خصوص مخلوط سه‌گانه آن‌ها به دلیل تأثیرگذاری بیشتر این نوع روغن‌ها بر روی ویژگی‌های عملکردی و آلایندگی موتور دیزل به علاوه استفاده هم‌زمان از رگرسیون خطی، غیرخطی و سیستم استنتاج فازی-عصبی (انقبس) به منظور پیش‌بینی ویژگی‌های مذکور و مقایسه نتایج آن‌ها در تحقیقات مغفول مانده است. بنابراین، هدف اصلی تحقیق حاضر، ارزیابی ویژگی‌های عملکردی و آلایندگی موتور تک‌سیلندر پاشش مستقیم با استفاده از شش مجموعه مخلوط تک‌گانه و دو مجموعه مخلوط سه‌گانه بیودیزل حاصل از روغن‌های کلزا، سویا و پالم در نسبت‌های ۱۰ و ۲۰ درصد با محدوده سرعت متغیر موتور از ۱۸۰۰ تا ۲۷۰۰ دور بر دقیقه با گام ۳۰۰ دور بر دقیقه در شرایط بار کامل و پیش‌بینی نتایج با استفاده از مدل‌های رگرسیون خطی، غیرخطی و سامانه استنتاج فازی-عصبی تطبیقی (انقبس) می‌باشد.

## مواد و روش‌ها

### فرآیند استخراج روغن و تولید سوخت بیودیزل

نتایج نشان داد که سوخت بیودیزل تولیدشده مشابه سوخت دیزل می‌باشد. همچنین مشخص شد که آلایندگی‌های خروجی از احتراق مخلوط‌های بیودیزل، به جز آلایندگی NO<sub>x</sub>، کمتر از دیزل است. در نهایت مشخص شد که B10 مخلوط بهینه‌ای در بهبود عملکرد موتور از نظر سرعت، توان و بازده حرارتی و B30 مخلوط بهینه‌ای در جهت کاهش آلایندگی موتور بدون هیچ‌گونه تغییری در موتور دیزل است (Ogunkunle & Ahmed, 2020). در پژوهشی دیگر، ویژگی‌های عملکردی و آلایندگی سوخت بیودیزل حاصل از روغن پسماند آشپزخانه با شرایط ۲۰ و ۴۰ درصد حجمی در ترکیب با دیزل خالص روی یک موتور دیزل تک‌سیلندر احتراق تراکمی در بارهای مختلف مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که با افزایش سوخت بیودیزل نسبت به دیزل مخصوصاً B40 مقدار بیشینه فشار داخل سیلندر ۲۴/۳۵ درصد افزایش اما مصرف سوخت ویژه ۲۲/۲۲ درصد کاهش می‌یابد. همچنین راندمان حرارتی ترمزی در مخلوط سوخت B40 کاهش قابل توجهی در حدود ۲۹/۹۱ درصد داشت. از طرفی در مخلوط سوخت B40، آلایندگی‌های NO<sub>x</sub>، HC و CO به ترتیب ۶۱/۸۹ درصد، ۴۲/۴۲ درصد و ۶۳/۹۳ درصد نسبت به سوخت دیزل کاهش یافت. در نتیجه مخلوط سوخت B40 به عنوان سوخت بهینه انتخاب شد (Elkelawy et al., 2021).

از سوی دیگر، روش‌های پیش‌بینی را در حالت کلی می‌توان به سه دسته تقسیم‌بندی نمود. مدل‌های ریاضی، مدل‌های تحلیلی و مدل‌های کامپیوتری. مدل‌های کامپیوتری به چندین دسته از جمله شبکه عصبی مصنوعی (ANN)، منطق فازی (FIS)، سیستم استنتاج فازی-عصبی تطبیقی (ANFIS) و روش سطح پاسخ (RSM) دسته‌بندی می‌گردد (Askari et al., 2021). با استفاده از این مدل‌های کامپیوتری و برنامه‌های شبیه‌سازی در تحقیقات علمی، پیش‌بینی پارامترهای تحت بررسی در مدت زمان کوتاه‌تر و صرف هزینه پایین‌تر صورت می‌گیرد. در همین زمینه، هوسوز و همکاران (Hosoz, Ertunc, Karabektas, & Ergen, 2013) به مدل‌سازی توان و آلایندگی‌های CO و CO<sub>2</sub> موتور دیزل با استفاده از انقبس پرداختند. نتایج نشان داد که انقبس با دقت بالا (ضریب همبستگی بالاتر از ۰/۹۴) توانست نتایج تجربی را مدل‌سازی نماید. قنبری و همکاران (Ghanbari et al., 2015) به مدل‌سازی توان، گشتاور و مصرف سوخت ویژه موتور و آلایندگی CO<sub>2</sub> در خروجی موتور دیزل جین آزمون سوخت دیزل در ترکیب با ذرات نانو با استفاده از انقبس پرداختند. نتایج نشان داد تابع عضویت منحنی گاوس (gaussmf) و ۲۰۰ دوره آموزش (تکرار) گزینه بهینه برای روند آموزش بود. افزودن ذرات نانو به سوخت دیزل موجب افزایش قدرت و گشتاور و کاهش مصرف سوخت ویژه موتور شد. با افزایش غلظت ذرات نانو در سوخت، انتشار آلایندگی CO<sub>2</sub> افزایش یافت. سیاد و همکاران (Sayed, Kumar Das, & Kulkarni, 2021) ویژگی‌های عملکردی و آلایندگی

واکنش ترانس استریفیکاسیون مورد نیاز برای تبدیل روغن به بیودیزل، اسید چرب آزاد (FFA) روغن‌ها بود که به‌طور میانگین تقریباً ۰/۹۲ درصد اندازه‌گیری شد. لذا از شرایط بهینه گزارش شده اوگونکونله و احمد (Ogunkunle & Ahmed, 2019a) استفاده شد. بدین صورت که برای انجام واکنش ترانس استریفیکاسیون از متانول به دلیل واکنش سریع و زنجیره عملکردی کوتاه‌تر به‌عنوان الکل و از پتاسیم هیدروکسید با ۱ درصد وزنی روغن و نسبت مولی الکل به روغن ۱ به ۶ به‌عنوان کاتالیزور استفاده شد. برای بهبود عدد ستان و مقادیر گرمایش بیودیزل‌های تولیدشده از روغن‌های گیاهی و کاهش ویسکوزیته عموماً ترانس استریفیکاسیون مورد نیاز است. نمونه‌ای از سوخت‌های بیودیزل تولیدشده در شکل ۱ نشان داده شده است.

باتوجه به مغفول ماندن استحصال بیودیزل از روغن گیاهان کلزا، سویا و پالم در تحقیقات و به دلیل تأثیرگذاری بیشتر این نوع روغن‌ها بر روی ویژگی‌های عملکرد و آلاینده‌ی موتور دیزل، از آن‌ها به‌عنوان روغن‌های پایه تولید سوخت بیودیزل در دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری استفاده شد (Khiraiya et al., 2021). روغن‌ها به کمک حلال N-هگزان به دلیل کم‌هزینه بودن و عملکرد نسبی بالای آن در برابر سایر انواع حلال‌ها از دانه‌های کلزا، سویا و پالم استخراج شد (Ogunkunle & Ahmed, 2019b; Lee, Yi, Cho, & Ahn, 2022). آزمایش به مدت ۵ ساعت در دمای استخراج ۶۲ درجه سانتی‌گراد با استفاده از نسبت دانه به حلال ۰/۰۴ گرم در میلی‌لیتر انجام شد. تضمین استفاده کاتالیز مستقیم قلبایی برای



شکل ۱- نمونه‌ای از بیودیزل تولیدی پالم (سمت راست) و سویا (سمت چپ)

Fig. 1. Palm (right) and soybean (left) biodiesel samples

و ۲ مخلوط سه‌گانه سوخت دیزل-بیودیزل حاصل از گیاهان کلزا (BC)، سویا (BS) و پالم (BP) با ۱۰ و ۲۰ درصد حجمی مطابق با جدول ۱ تهیه شد. جرم مولی (جرم اتمی) آن‌ها به همراه نحوه تعریف در ترسیمه‌های انفیس نیز در جدول ۱ آمده است.

آماده‌سازی مخلوط‌ها

به‌منظور انجام آزمون‌های عملکرد و آلاینده‌ی موتور، ۹ نوع سوخت شامل دیزل خالص به‌عنوان شاهد به همراه ۶ مخلوط تک‌گانه

جدول ۱- مشخصات مخلوط‌های سوخت دیزل و بیودیزل مورد مطالعه به همراه جرم مولی و نحوه تعریف در ترسیمه‌های انفیس

Table 1- Properties of diesel and biodiesel fuel mixtures with the molar mass and description in ANFIS diagrams

نوع سوخت Fuel Type	B0 (D100)	BS10	BS20	BP10	BP20	BR10	BR20	BSRP10	BSRP20
مفهوم Description	دیزل خالص Pure diesel	۱۰ درصد بیودیزل سویا soybean biodiesel	۲۰ درصد بیودیزل سویا soybean biodiesel	۱۰ درصد بیودیزل پالم palm biodiesel	۲۰ درصد بیودیزل پالم palm biodiesel	۱۰ درصد بیودیزل کلزا rapeseed biodiesel	۲۰ درصد بیودیزل کلزا rapeseed biodiesel	۱۰ درصد بیودیزل سویا، کلزا، پالم soybean, rapeseed, and palm biodiesel	۲۰ درصد بیودیزل سویا، کلزا، پالم soybean, rapeseed, and palm biodiesel

جرم مولی یا جرم اتمی Molar mass or atomic mass (g mol <sup>-1</sup> )	167	178.5	190	175.9	184.8	178.3	189.6	177.567	188.133
تعریف شده در ترسیمه‌های انفیس Described in ANFIS diagrams	1	2	3	4	5	6	7	8	9

شد. نقطه اشتعال با استفاده از آزمونگر فنجان بسته Pensky-  
Martens تعیین شد. نقطه ابری با استفاده از روش ASTM D2500  
توسط بازرسی بصری برای نمایان شدن مه هنگام سرد شدن نمونه در  
یخچال تعیین شد.

جدول ۲ بیانگر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی سوخت‌های تحت  
بررسی با استفاده از روابط استاندارد انجمن ایالات متحده آمریکا برای  
آزمایش و مواد (ASTM) تعیین شد. جرم مخصوص و ویسکوزیته  
نمونه‌ها با استفاده از دستگاه ویسکومتر مویرگی شیشه‌ای مدرج تعیین

جدول ۲- خصوصیات سوخت دیزل و بیودیزل‌های مورداستفاده طبق استاندارد ASTM  
Table 2- Properties of used diesel and biodiesel fuels based on ASTM standard

خصوصیات Properties	روش آزمون Test method	حدود مجاز Permissible limit	دیزل خالص Pure diesel	بیودیزل کلزا Rapeseed biodiesel	بیودیزل سویا Soybean biodiesel	بیودیزل پالم Palm biodiesel	واحد Unit
نقطه اشتعال Flash point	D92	Min 130	62	176	161	174	°C
نقطه ابری Cloud point	D2500	-	-	-1	7	5	°C
آب و رسوبات Water and sediment	D2709	Max 0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	% Vol
گرانروی سینماتیکی Kinematic viscosity	D445	1.6-9	3.35	4.68	4.73	4.5	mm <sup>2</sup> s <sup>-1</sup>
ارزش حرارتی Thermal value	D240	-	46.8	37.74	37.66	41.3	MJ kg <sup>-1</sup>
چگالی Density	D4052	0.86-0.90	0.83	0.85	0.85	0.86	g cm <sup>-3</sup>

دیزل، سیستم جمع‌آوری اطلاعات (کامپیوتر)، خروجی یا آگروز،  
آلاینده‌سنج جهت تجزیه و تحلیل گاز و حسگرهای مختلف برای  
اندازه‌گیری سوخت. باتوجه به ۴ دور موتور و ۹ نوع سوخت مجموعاً  
۳۶ آزمون انجام شد. غلظت آلاینده‌های گازها، مانند هیدروکربن (HC)  
و اکسیدهای نیتروژن (NOx) بر حسب ppm و آلاینده‌های دی‌اکسید  
کربن (CO<sub>2</sub>) و مونواکسید کربن (CO) بر حسب درصد حجمی با  
استفاده از آنالیزگر MAHA MGT5 اندازه‌گیری شد. داده‌های  
عملکرد و آلاینده‌ها ثبت شده در سه تکرار مدنظر قرار گرفت.  
توضیحات بیشتر در خصوص مشخصات موتور و طرح شماتیک آزمون

### مشخصات موتور و روش آزمایش

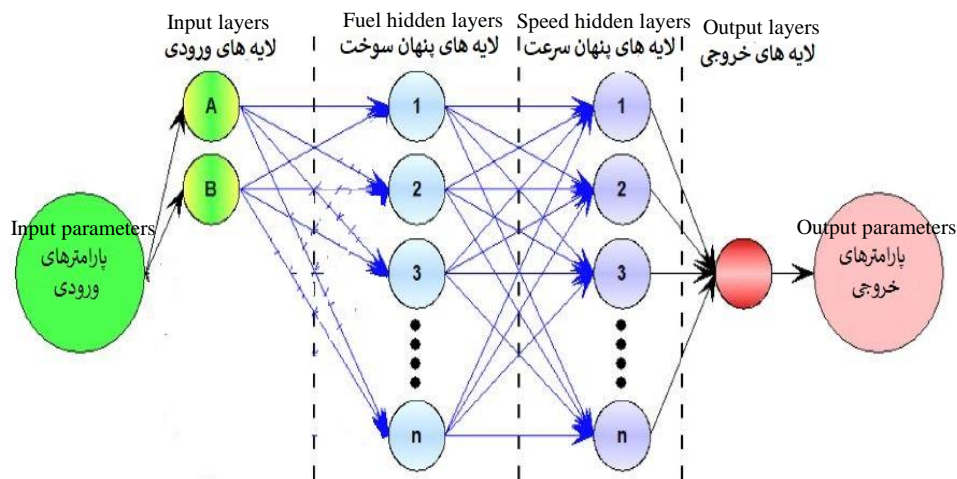
به‌منظور ارزیابی ویژگی‌های عملکرد و آلاینده‌های موتور حین  
استفاده از مخلوط‌های سوخت تولیدشده، یک موتور دیزل تک‌سیلندر  
در چهار دور موتور شامل ۱۸۰۰، ۲۱۰۰، ۲۴۰۰ و ۲۷۰۰ دور بر دقیقه  
تحت بارگذاری کامل در دانشگاه تربیت مدرس مورد بررسی قرار  
گرفت. اجزای اصلی مورد استفاده عبارتند از: موتور دیزل تک‌سیلندر،  
دینامومتر جریان گردابی D400، واحد کنترل برای اعمال بار همراه با  
نمایشگر دیجیتال، مخازن ذخیره سوخت برای مخلوط بیودیزل و

نظر استفاده می‌شود که شامل سه لایه تحت عنوان لایه‌های ورودی، پنهان و خروجی نام‌گذاری می‌شوند. در مطالعه حاضر، مدل انفیس با در نظر گرفتن نوع سوخت و سرعت به‌عنوان توابع ورودی برای پیش‌بینی پارامترهای عملکرد و آلاینده‌گی موتور تحت بار کامل (۱۰۰ درصد) به‌عنوان لایه خروجی انتخاب شده است که تابع هدف را برای همبستگی پاسخ‌های خروجی با تعداد پارامترهای ورودی انتخاب شده فراهم می‌کند که طبق طراحی آزمایشات، متغیرهای ورودی شامل ۹ مجموعه سوخت و ۴ سرعت موتور بوده و به‌صورت  $X1$  تا  $X9$  و  $Y1$  تا  $Y4$  در شکل ۲ نشان داده شده است. با تغییر تابع عضویت در ورودی، نتایج متفاوت با دقت‌های متفاوت در خروجی انفیس خواهیم داشت. پس باید از معیاری به‌منظور شناسایی بهترین تابع عضویت با کمترین خطا و بیشترین قرابت نتایج پیش‌بینی شده در خروجی نسبت به نتایج حاصل از آزمون تجربی استفاده شود. پس از مطالعه پژوهش‌های قبلی در این خصوص، دقت نتایج پیش‌بینی شده توسط انفیس و دقت نتایج پیش‌بینی شده توسط رگرسیون خطی و غیرخطی به کمک ضریب تبیین ( $R^2$ ) ارزیابی و مقایسه شدند.

آزمایشی در پژوهش موسوی سیدی و همکاران ( Mousavi Seyedi, Askari, & Miri, 2023) ارائه شده است.

**استفاده از رگرسیون خطی، غیرخطی و انفیس به‌منظور پیش‌بینی**

محققان به دلیل ناتوان بودن در پیش‌بینی متغیرهای خروجی در صورت آزمون کمیت‌های اندازه‌گیری نشده در ورودی، نیازمند روشی جایگزین جهت حل مسئله هستند. از روش‌های پیش‌بینی پارامترهای تحت بررسی در تحقیقات علمی و مسائل پیچیده مهندسی، استفاده از رگرسیون خطی، غیرخطی و سیستم استنتاج فازی- عصبی تطبیقی (ANFIS) است که نتایج تحقیقات گذشته، تاحدودی مزیت گزینه سوم نسبت به گزینه اول را به‌عنوان یک روش قابل‌دوام برای چنین مسائلی اثبات نموده است. اما گزینه دوم بسیار کم مورد بررسی قرار گرفته است. روش انفیس، قوی‌تر از رگرسیون خطی بوده و مجموعه‌ای از رویه‌های ریاضی مبتنی بر آمار است که عمدتاً برای توسعه مدل پیش‌بینی برای تجزیه و تحلیل پارامترهای خروجی مورد



شکل ۲- نمایشی از مدل شبیه‌سازی شده به کمک سامانه استنتاج فازی- عصبی تطبیقی (انفیس)  
**Fig. 2.** A view of simulated model using ANFIS

سینماتیکی بالاتر بیودیزل نسبت به دیزل خالص، افزایش می‌یابد. درخصوص گشتاور مشخص شد که با افزایش دور موتور از ۱۸۰۰ به ۲۷۰۰ دور بر دقیقه، گشتاور موتور به‌صورت ثابت کاهش یافته و این گشتاور در سرعت بالا کاهش زیادی یافت. درخصوص مصرف سوخت ویژه مشخص شد که در همه مخلوط‌ها با افزایش سرعت موتور، مصرف سوخت ویژه افزایش می‌یابد که می‌تواند به دلیل کاهش گشتاور و توان موتور مخصوصاً در سرعت ۲۷۰۰ دور بر دقیقه باشد. در مجموع و در همه سوخت‌های ترکیبی، مقادیر توان و مصرف سوخت ویژه با افزایش سرعت موتور، افزایش اما گشتاور کاهش یافت.

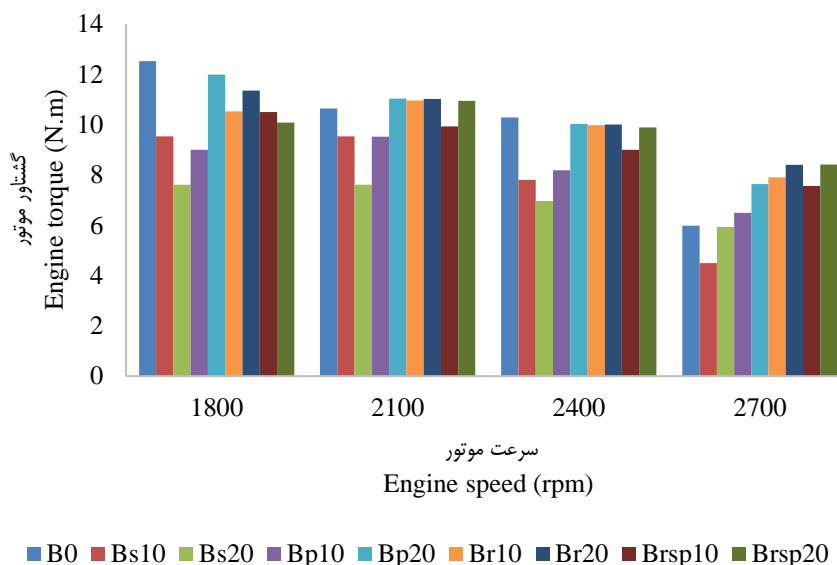
**نتایج و بحث**

**نتایج آزمایشگاهی**

نتایج آزمایشگاهی نشان داد که با افزایش سرعت موتور تا دور ۲۴۰۰ دور بر دقیقه، توان موتور در همه مخلوط‌ها از جمله دیزل افزایش و سپس کاهش می‌یابد. دلیل این کاهش توان بعد از دور مذکور، افزایش تلفات اصطکاکی و کاهش راندمان حجمی موتور است. از طرفی در سرعت ۲۷۰۰ دور بر دقیقه با افزایش بیودیزل نسبت به دیزل خالص، مقدار توان موتور به دلیل ویسکوزیته

ویژه و آلاینده‌ها کاهش یافت. بر اساس نتایج، سوخت ترکیبی بیودیزل پالم می‌تواند به‌عنوان سوخت جایگزین در موتورهای دیزل بدون هیچ‌گونه تغییر در ساختار موتور استفاده شود. به‌عنوان نمونه، شکل ۳ نتایج آزمایشگاهی تغییرات گشتاور مخلوط‌های مختلف سوخت دیزل و بیودیزل را به‌عنوان تابعی از سرعت موتور نشان می‌دهد.

همچنین مقادیر آلاینده‌ها با افزایش سرعت موتور، افزایش یافت. سوخت‌های BS20، BP20، BP10 و BP20 به‌ترتیب برای آلاینده‌های HC، NOx، CO<sub>2</sub> و CO عملکرد بهتری از لحاظ کاهش آلاینده‌ها در سرعت پایین نسبت به سایر سوخت‌ها داشتند. در سرعت‌های بالا با افزایش درصد اختلاط بیودیزل و دیزل از ۱۰ به ۲۰ درصد، مقدار توان و گشتاور موتور افزایش اما میزان مصرف سوخت



شکل ۳- تغییرات گشتاور موتور در سرعت‌های مختلف برای سوخت‌های آزمایش شده  
**Fig. 3.** Changes in the engine torque at different speeds for the tested fuels

اطلاعات بیشتر درخصوص نتایج این بخش در پژوهش موسوی سیدی و همکاران (Mousavi Seyedi et al., 2023) در دسترس است.

### نتایج مدل‌سازی توسط رگرسیون خطی

با استفاده از نرم‌افزار SPSS به تجزیه داده‌ها و تشکیل مدل‌های رگرسیون خطی پرداخته شد. نتایج به‌دست‌آمده، در جدول ۳ قابل‌مشاهده است. در این جدول، P=توان، T=گشتاور و SFC=مصرف سوخت ویژه موتور می‌باشد. به‌منظور مدل‌سازی پارامترهای تحت بررسی در هر سه روش رگرسیون خطی، غیرخطی و انفیسی، برای تعریف انواع سوخت‌های تحت آزمون از جرم مولی یا جرم اتمی (بر حسب گرم بر مول) آن‌ها استفاده شد (جدول ۱). بنابراین به‌ترتیب برای تعریف سوخت دیزل خالص، بیودیزل ۱۰ و ۲۰ درصد سویا، بیودیزل ۱۰ و ۲۰ درصد پالم، بیودیزل ۱۰ و ۲۰ درصد کلزا و ترکیب ۳ بیودیزل مذکور در نسبت ۱۰ و ۲۰ درصد از اعداد ۱۶۷، ۱۷۸/۵، ۱۹۰، ۱۷۵/۹، ۱۸۴/۸، ۱۷۸/۳، ۱۸۹/۶، ۱۷۷/۵۶۷ و ۱۸۸/۱۳۳ با توجه به فرمول شیمیایی مختص به هر سوخت، جرم اتمی (مولی) و تعداد

در همه مخلوط‌ها، گشتاور موتور با افزایش سرعت موتور کاهش یافت. در تحقیقات قبلی نیز گزارش شده است که در موتورهای تزریق مستقیم، مقادیر حداکثر سرعت موتور، باعث کاهش بازده حجمی و افزایش تلفات مکانیکی می‌گردد (Cihan, 2021). میانگین کاهش گشتاور در سرعت‌های ۱۸۰۰، ۲۱۰۰، ۲۴۰۰ و ۲۷۰۰ دور بر دقیقه به‌ترتیب برابر ۱۱/۳۵، ۱۰/۲۳، ۹/۸۶ و ۷/۵۲ نیوتن‌متر بود. با افزایش نسبت بیودیزل در مخلوط سوخت، گشتاور موتور کاهش یافت که این امر به دلیل ارزش حرارتی کمتر و ویسکوزیته بالاتر مخلوط‌های بیودیزل نسبت به دیزل بود. از طرف دیگر این امر می‌تواند مرتبط با دمای گاز خروجی به‌واسطه احتراق در سیلندر باشد. می‌توان گفت که هرچه درجه حرارت بالاتر باشد، عمل سوختن بهتر انجام می‌گردد (Chuah et al., 2015). لذا افزایش در گشتاور موتور برای مخلوط سوخت BP20 (۱/۷۲ درصد) در سرعت ۱۸۰۰ دور بر دقیقه نسبت به دیزل خالص مشاهده شد در حالی که کاهش قابل‌توجهی برای BS10 (۲۰/۱۱ درصد) در سرعت ۲۷۰۰ دور بر دقیقه نسبت به دیزل خالص مشاهده گردید. موتور مورد‌استفاده در تحقیق حاضر، بالاترین گشتاور را در هنگام کار با BP20 در سرعت ۱۸۰۰ دور بر دقیقه داشت.



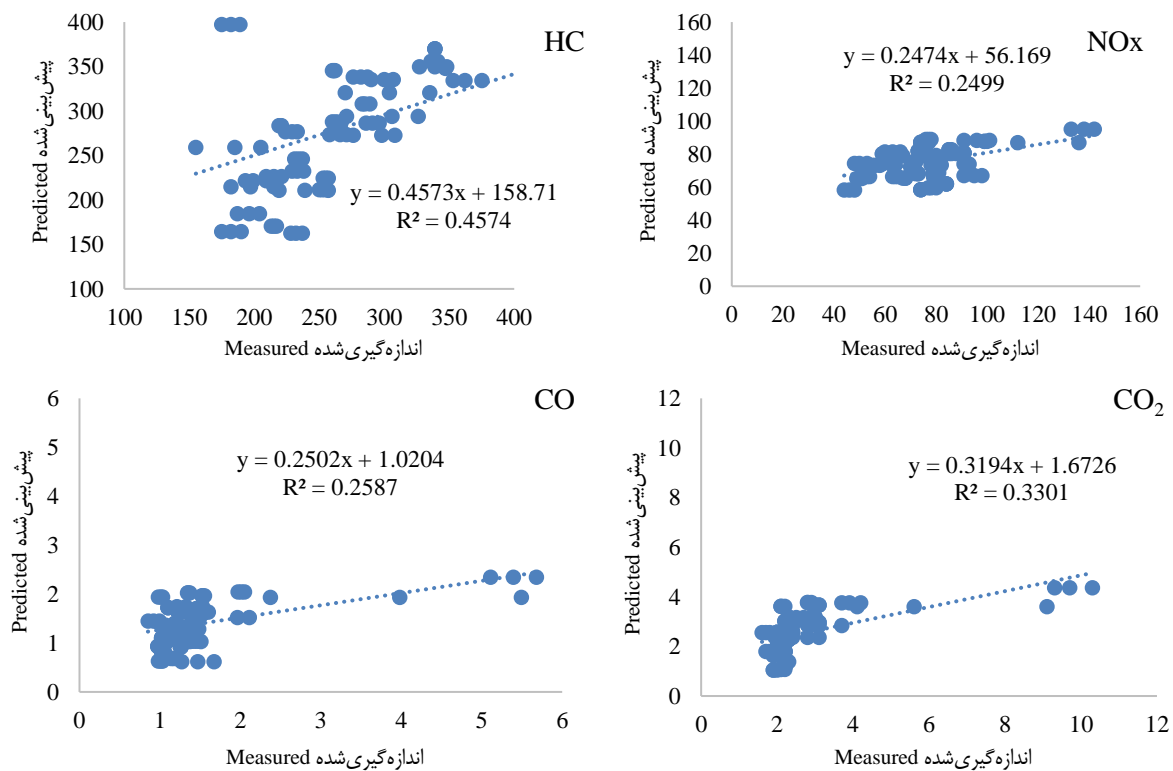
**جدول ۳- مدل‌های رگرسیون خطی درخصوص پارامترهای تحت بررسی**

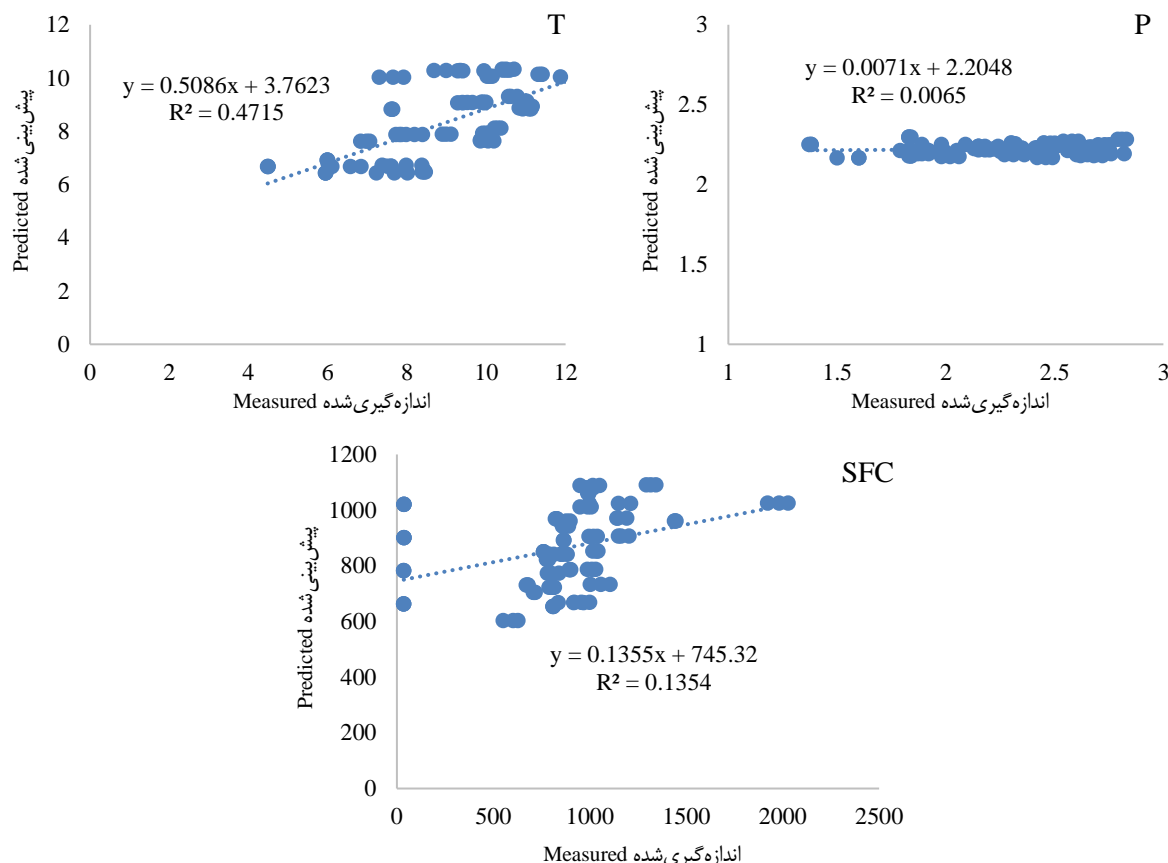
**Table 3- Linear regression models of the studied parameters**

پارامتر Parameter	مدل رگرسیونی Regression model
NOx (ppm)	$Y = 150.405 - 0.703 \text{ Fuel} + 0.023 \text{ Speed}$
HC (ppm)	$Y = 587.144 - 4.186 \text{ Fuel} + 0.206 \text{ Speed}$
CO <sub>2</sub> (% Vol)	$Y = 9.977 - 0.066 \text{ Fuel} + 0.002 \text{ Speed}$
CO (% Vol)	$Y = 5.654 - 0.036 \text{ Fuel} + 0.001 \text{ Speed}$
P (kW)	$Y = 2.851 - 0.004 \text{ Fuel} + 0.00004198 \text{ Speed}$
T (N.m)	$Y = 21.220 - 0.021 \text{ Fuel} - 0.004 \text{ Speed}$
SFC (gkW h <sup>-1</sup> )	$Y = -1051.232 + 5.633 \text{ Fuel} + 0.397 \text{ Speed}$

است. همان‌گونه که ملاحظه می‌گردد، ضرایب تبیین مدل‌های رگرسیون خطی مقادیر بالایی نیستند (۰/۰۰ الی ۰/۴۷) و در واقع این مدل‌ها نتوانستند با دقت بالایی به پیش‌بینی پارامترهای تحت بررسی بپردازند.

در ادامه نمودارهای مربوط به پیش‌بینی مقادیر ارائه‌شده توسط مدل‌های رگرسیون خطی در مقابل مقادیر اندازه‌گیری‌شده ارائه شده است. محور افقی در شکل ۴ مقادیر واقعی (اندازه‌گیری‌شده در آزمون) و محور عمودی مقادیر پیش‌بینی‌شده توسط معادلات رگرسیون خطی





شکل ۴- همبستگی میان مقادیر اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده توسط مدل‌های رگرسیون خطی  
**Fig. 4.** Correlation between measured and predicted data using linear regression models

در روابط فوق،  $a$ ،  $b_1$ ،  $b_2$ ،  $c_1$ ،  $c_2$  و  $d$  ضرایب ثابت بهینه‌ای هستند که در جداول ۴ و ۵ ارائه شده‌اند. همچنین متغیر  $X_1$  مربوط به نوع سوخت تحت بررسی که توسط جرم مولی یا جرم اتمی (بر حسب گرم بر مول) آن‌ها (مطابق با جدول ۱) به صورت کمی (عددی) تعریف شده و متغیر  $X_2$  دور موتور ۱۸۰۰، ۲۱۰۰، ۲۴۰۰ و ۲۷۰۰ دور بر دقیقه است.

#### نتایج مدل‌سازی توسط رگرسیون غیرخطی

به کمک جستجو در پژوهش‌های مدل‌سازی رگرسیون غیرخطی و معادلات غیرخطی پیش‌فرض ارائه شده توسط نرم‌افزارهای Excel و SPSS، دو رابطه مدل‌سازی رگرسیون غیرخطی پرتکرار به صورت روابط (۱) و (۲) تحت بررسی قرار گرفت.

$$Y = a + b_1 X_1 + b_2 X_2 + c_1 X_1^2 + c_2 X_2^2 + d X_1 X_2 \quad (1)$$

$$Y = a \exp(b_1 X_1 + b_2 X_2) \quad (2)$$

#### جدول ۴- ضرایب رابطه ۱

**Table 4-** Coefficients of relation 1

ضریب Coefficient	Amount مقدار						
	NO <sub>x</sub>	HC	CO <sub>2</sub>	CO	P	T	SFC
a	2.00E-03	5.12E-09	4.02E-07	0.01	1.58E-06	0.01	0.99
b <sub>1</sub>	2.52	0	0.04	0.01	5.16E-05	0.099	0.97
b <sub>2</sub>	0.0835	0	0.098	0	3.14E-06	0.0021	0.39
c <sub>1</sub>	3.81E-06	1.21E-09	2.64E-05	0	3.36E-06	0.098	0.03
c <sub>2</sub>	4.33E-06	4.43E-05	6.48E-07	0.01	0	0.01	5.99E-04

d	0.01	5.15E-05	1.10E-06	0.01	0.002	0.02	0.03
---	------	----------	----------	------	-------	------	------

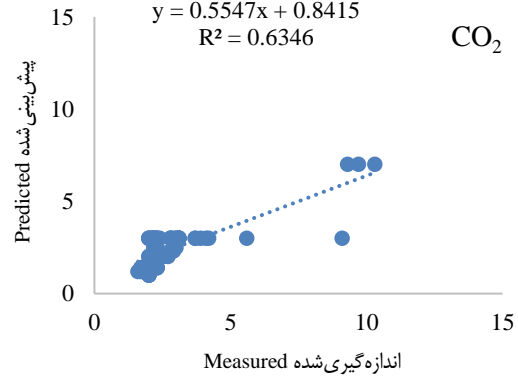
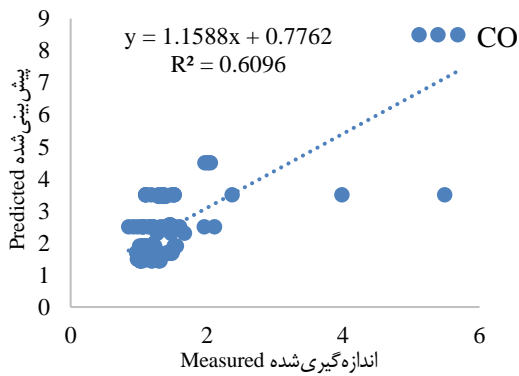
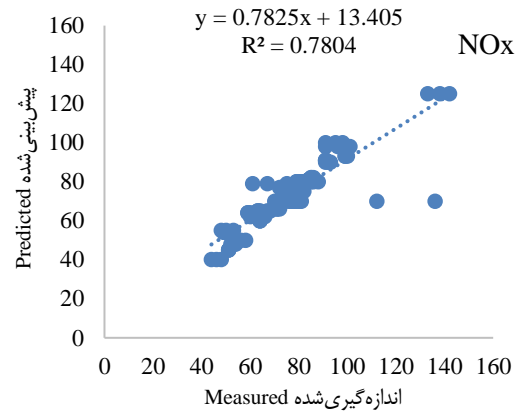
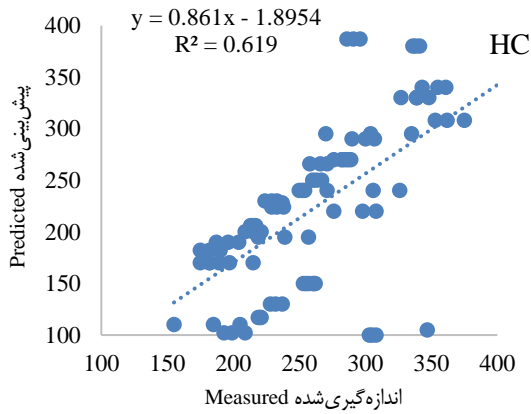
جدول ۵- ضرایب رابطه ۲

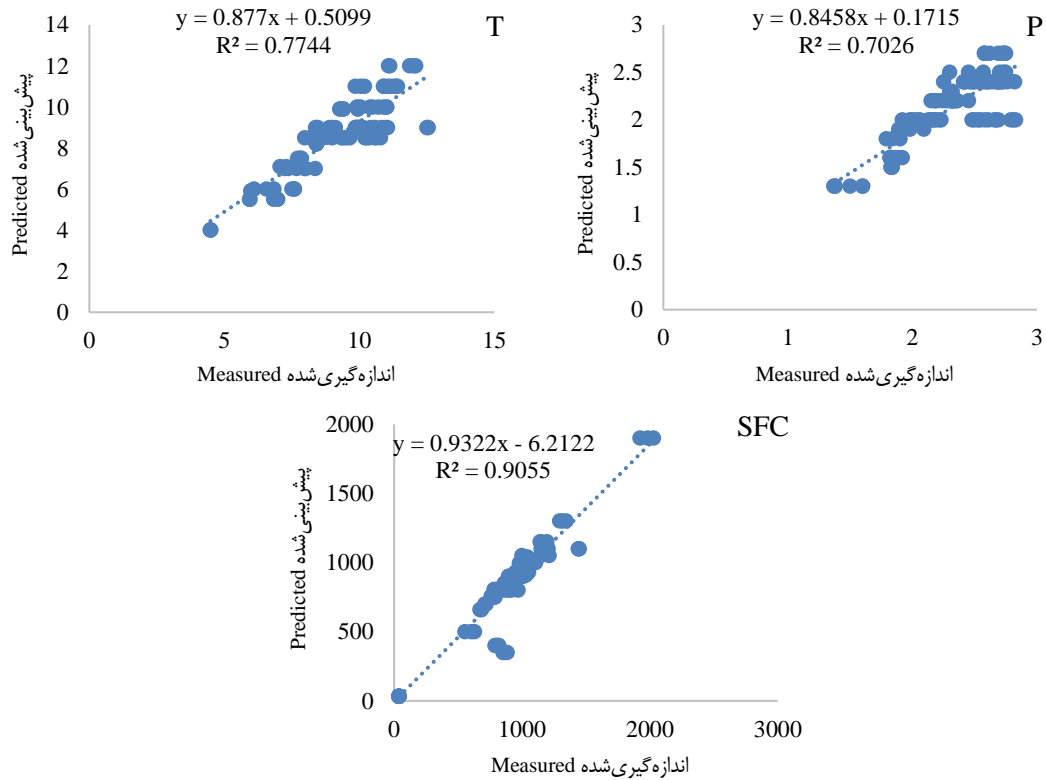
Table 5- Coefficients of relation 2

ضریب Coefficient	مقدار Amount						
	NO <sub>x</sub>	HC	CO <sub>2</sub>	CO	P	T	SFC
a	30.75	36.727	0.39	0.225	3.1167	5.749	171.09
b <sub>1</sub>	0.016	0	0.002	0.001	0.9463	0.022	0.003
b <sub>2</sub>	0.0504	0.0919	0.873	0.0912	3.21E-03	0.00231	0

ارائه شده توسط مدل های رگرسیونی غیرخطی ۱ و ۲ در مقابل مقادیر اندازه گیری شده ارائه شده است.

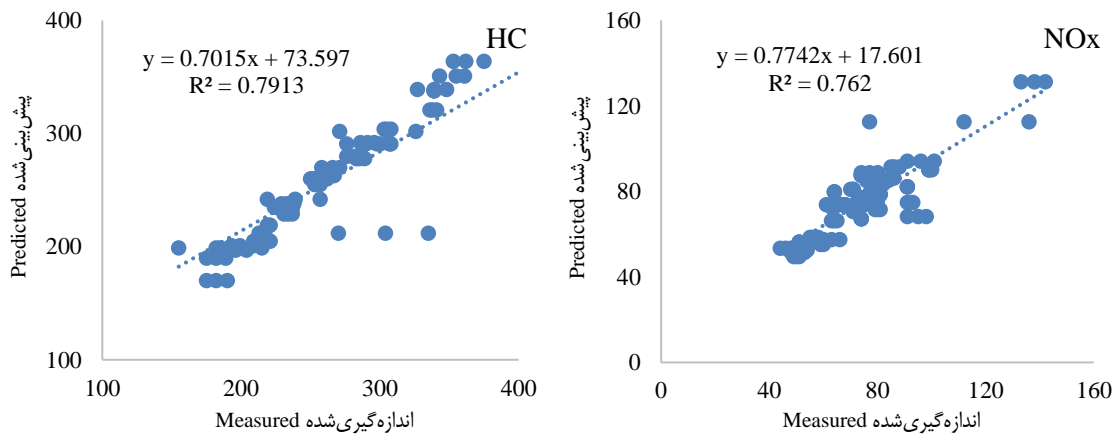
با جای گذاری ضرایب بهینه و مقادیر مرتبط با نوع سوخت و دور موتور، مقادیر پیش بینی شده برای هر داده ورودی به دست آمد. به ترتیب در شکل های ۵ و ۶ نمودارهای مربوط به پیش بینی مقادیر

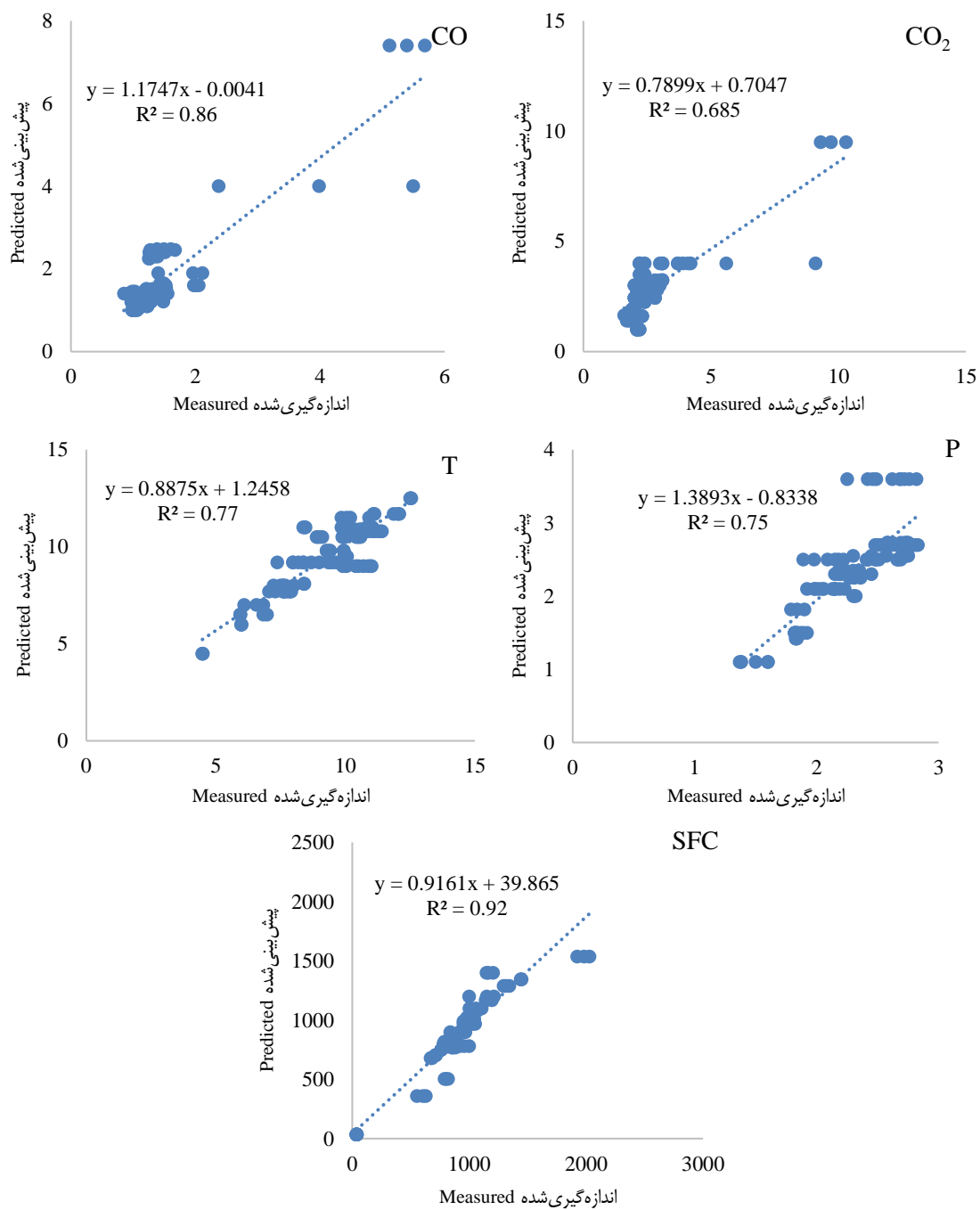




شکل ۵- همبستگی میان مقادیر اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده توسط رابطه ۱ رگرسیون غیرخطی

Fig. 5. Correlation between measured and predicted data using relation 1 Non-linear regression





**شکل ۶ -** همبستگی میان مقادیر اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده توسط رابطه ۲ رگرسیون غیرخطی  
**Fig. 6.** Correlation between measured and predicted data using relation 2 Non-linear regression

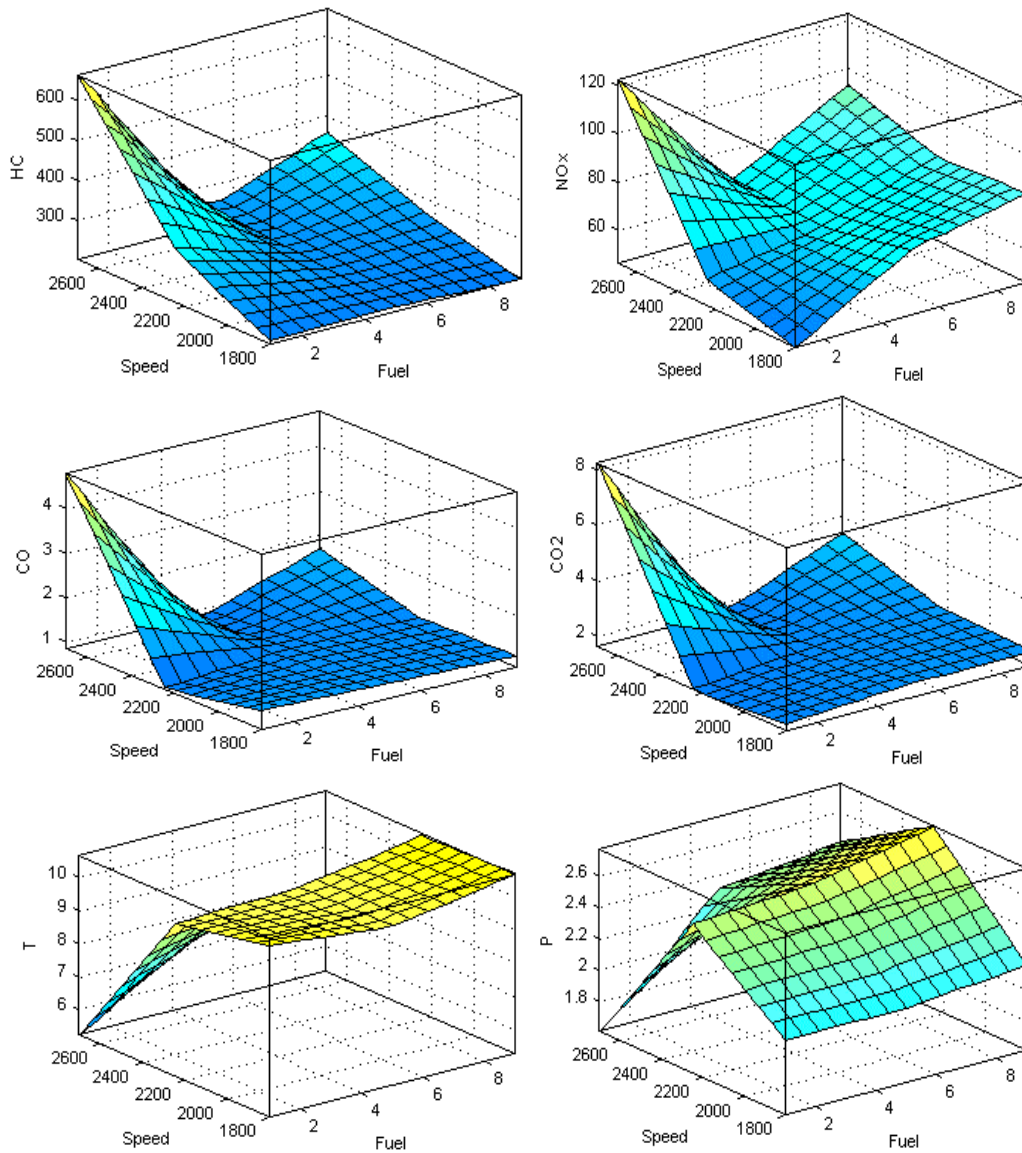
خطی مربوط به پارامترهای T و P به ترتیب به میزان ۰/۴۷ و ۰/۰۰ است در حالی که بیشترین و کمترین ضرایب تبیین در معادلات رگرسیون غیرخطی مربوط به پارامترهای SFC و CO به ترتیب به میزان ۰/۹۲ و ۰/۶۰ است.

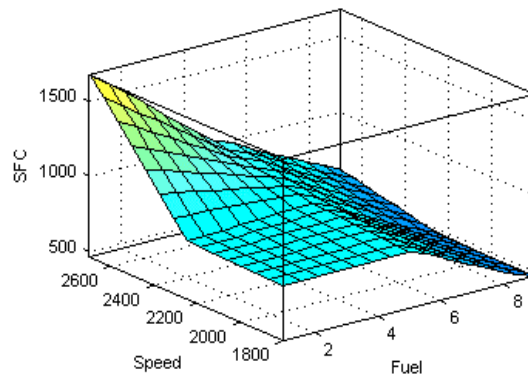
ضرایب تبیین (R<sup>2</sup>) میان داده‌های اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده توسط معادلات رگرسیون غیرخطی بیشتر از همین ضرایب در معادلات رگرسیون خطی است. در نتیجه معادلات رگرسیون غیرخطی ارائه شده با دقت بیشتری به پیش‌بینی پارامترهای تحت بررسی پرداختند. بیشترین و کمترین ضرایب تبیین در معادلات رگرسیون

است را محاسبه کرد (Askari & Abbaspour-Gilandeh, 2019; Shafaei, Loghavi, & Kamgar, 2019). در محور مربوط به نوع سوخت در این ترسیمه‌ها مطابق با جدول ۱، به ترتیب برای تعریف سوخت دیزل خالص، بیودیزل ۱۰ و ۲۰ درصد سویا، بیودیزل ۱۰ و ۲۰ درصد پالم، بیودیزل ۱۰ و ۲۰ درصد کلزا و ترکیب ۳ بیودیزل مذکور در نسبت ۱۰ و ۲۰ درصد از اعداد ۱ الی ۹ استفاده شده است.

### نتایج مدل‌سازی توسط انفیس

نتایج مربوط به بهترین مدل‌های انفیس در خصوص پارامترهای تحت بررسی در شکل ۷ آمده است. این بخش شامل ترسیمه‌های سه‌بعدی انفیس است. با استفاده از سطوح این شکل‌ها، می‌توان خروجی مدل مورد نظر را برای ورودی خاصی که داده‌برداری نشده

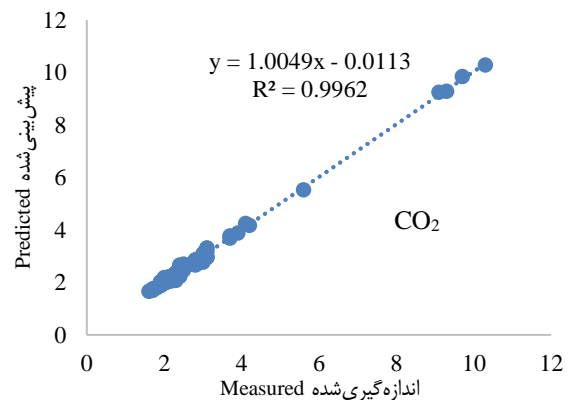
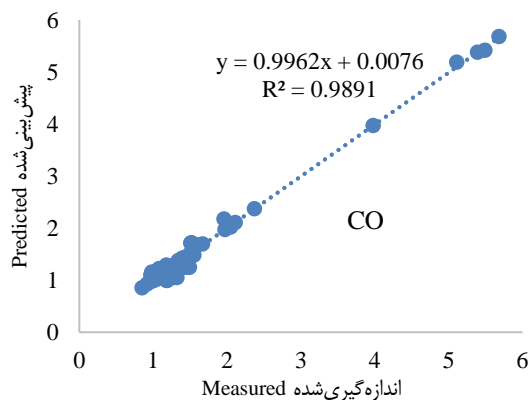
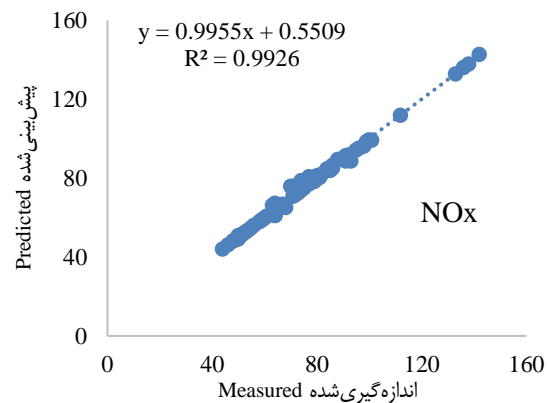
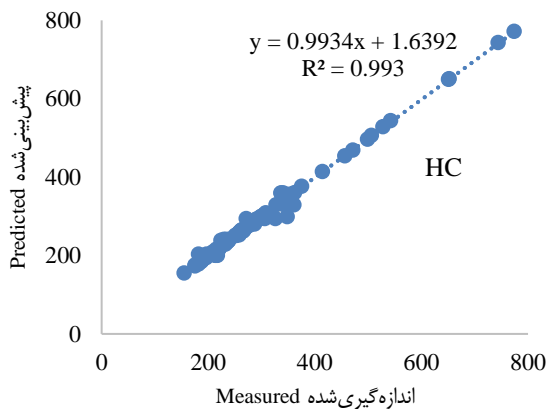


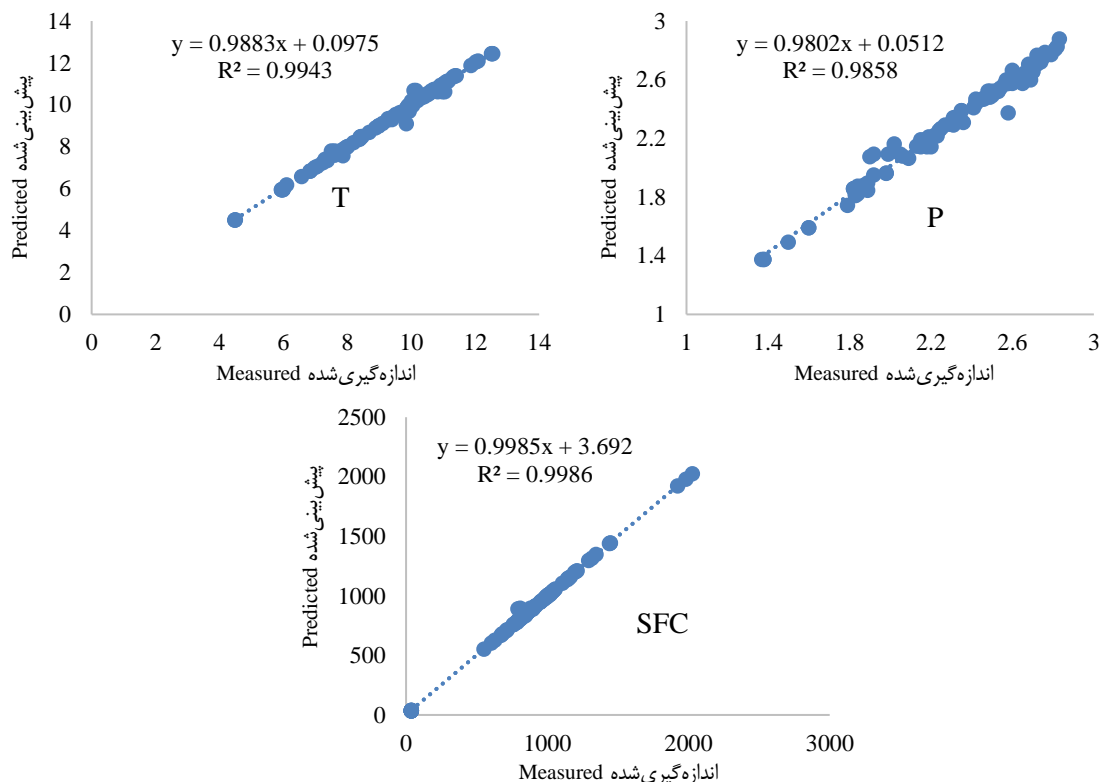


شکل ۷- سطوح سه بعدی بهترین مدل های انفیس به منظور پیش بینی پارامترهای تحت بررسی  
**Fig. 7.** 3D surfaces of best ANFIS models for predicting the studied parameters

پیش بینی شده توسط بهترین مدل های انفیس در خصوص پارامترهای تحت بررسی است. نتایج نشان داد که ضریب تبیین ( $R^2$ ) به عنوان معیار دقت پیش بینی مدل های انفیس بسیار بیشتر از مدل های رگرسیونی خطی و غیرخطی است.

در ادامه مقادیر پیش بینی شده توسط بهترین (دقیق ترین) مدل های انفیس برای تمامی پارامترهای تحت بررسی در مقابل مقادیر اندازه گیری شده در آزمون ها ترسیم گردید. محور افقی در شکل ۸ مقادیر واقعی (اندازه گیری شده در آزمون) و محور عمودی مقادیر





**شکل ۸-** همبستگی میان مقادیر اندازه‌گیری شده (محور افقی) و پیش‌بینی شده (محور عمودی) توسط مدل‌های انفیس  
**Fig. 8.** Correlation between measured (horizontal axis) and predicted (vertical axis) data using ANFIS models

نتایج بخش مدل‌سازی نشان داد که معادلات رگرسیون غیرخطی نسبت به نوع خطی با دقت بیشتری به پیش‌بینی پارامترهای تحت بررسی پرداختند. همچنین مشخص شد که بین مقادیر واقعی و پیش‌بینی شده متغیرهای عملکرد و آلایندگی موتور توسط انفیس، همبستگی بسیار بالاتری (ضریب تبیین بیشتر از ۰/۹۸) در قیاس با رگرسیون خطی (ضریب تبیین کمتر از ۰/۴۷) و رگرسیون غیرخطی (ضریب تبیین کمتر از ۰/۹۲) وجود دارد. بیشترین و کمترین ضرایب تبیین در معادلات ارائه‌شده توسط انفیس مربوط به پارامترهای SFC و P به ترتیب به میزان ۰/۹۹ و ۰/۹۸ است که بسیار بیشتر از ضرایب تبیین بیشینه و کمینه در معادلات رگرسیون خطی (۰/۴۷ و ۰/۰۰) و غیرخطی (۰/۹۲ و ۰/۶۰) است. در مجموع و در میان تمامی پارامترهای بررسی‌شده در پژوهش حاضر و تمامی مدل‌های رگرسیون خطی، غیرخطی و انفیس، بیشترین ضریب متوسط تبیین مربوط به گشتاور موتور (T=۰/۷۵۲۵) و کمترین ضریب متوسط تبیین مربوط به گشتاور موتور (P=۰/۶۱۱۲) می‌باشد. به علاوه، با استفاده از سطوح ترسیمه‌های سه‌بعدی انفیس می‌توان خروجی مدل مورد نظر برای ورودی خاصی که داده‌برداری نشده است را محاسبه کرد. در نتیجه می‌توان از انفیس به منظور پیش‌بینی بسیار دقیق پارامترهای عملکرد و آلایندگی موتور استفاده نمود. با استفاده از این روش پیش‌بینی مطمئن، کار آزمایشگاهی و اندازه‌گیری‌ها به‌طور قابل‌توجهی

همان‌گونه که ملاحظه می‌گردد، انفیس با دقت بسیار بالاتری در مقایسه با رگرسیون خطی و غیرخطی توانسته است که پارامترهای تحت بررسی را پیش‌بینی نماید. بیشترین و کمترین ضرایب تبیین در معادلات ارائه‌شده توسط انفیس مربوط به پارامترهای P و SFC به ترتیب به میزان ۰/۹۹ و ۰/۹۸ است که بسیار بیشتر از ضرایب تبیین بیشینه و کمینه در معادلات رگرسیون خطی (۰/۴۷ و ۰/۰۰) و غیرخطی (۰/۹۲ و ۰/۶۰) است. در مجموع و در میان تمامی پارامترهای بررسی‌شده در پژوهش حاضر و تمامی مدل‌های رگرسیون خطی، غیرخطی و انفیس، بیشترین ضریب متوسط تبیین مربوط به گشتاور موتور (T=۰/۷۵۲۵) و کمترین ضریب متوسط تبیین مربوط به توان موتور (P=۰/۶۱۱۲) می‌باشد.

### نتیجه‌گیری

نتایج بخش آزمایشگاهی نشان داد که در همه سوخت‌های ترکیبی مقادیر توان، مصرف سوخت ویژه و تمامی آلاینده‌ها با افزایش سرعت موتور، افزایش اما گشتاور کاهش یافت. بر اساس نتایج، سوخت ترکیبی بیودیزل پالم ۲۰ درصد می‌تواند به‌عنوان سوخت جایگزین در موتورهای دیزلی بدون هیچ‌گونه تغییر موتور استفاده شود.



### مشارکت نویسندگان

سیدرضا موسوی سیدی: جمع‌آوری داده‌ها، پردازش داده‌ها، تحلیل آماری، نظارت و مدیریت، روش‌شناسی  
محمد عسکری: خدمات نرم‌افزاری، تصویرسازی نتایج، شبیه‌سازی کامپیوتری، ویرایش متن  
سیدمحمدرضا میری: استخراج و تهیه متن اولیه، مفهوم‌سازی، مشاوره فنی

کاهش می‌یابد که در مدت زمان و هزینه امور آزمایشگاهی، صرفه‌جویی می‌گردد.

### سپاسگزاری

بدین وسیله از معاونت محترم پژوهشی دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری که فرصت تصویب و انجام این طرح پژوهشی با کد طرح ۰۲-۱۴۰۰-۱۱ را فراهم نمودند، تشکر و سپاسگزاری می‌شود.

### References

- Al-Dawudy, M. F. T. (2017). Theoretical study for the influence of biodiesel addition on the combustion, performance and emissions parameters of single cylinder diesel engine. *Journal of University of Babylon for Engineering Sciences*, 25(5), 1830-1839. <https://search.emarefa.net/detail/BIM-918202>
- Al-Dawody, M. F., Jazie, A., & Abdulkadhim Abbas, H. (2019). Experimental and simulation study for the effect of waste cooking oil methyl ester blended with diesel fuel on the performance and emissions of diesel engine. *Alexandria Engineering Journal*, 58, 9-17. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2018.05.009>
- Askari, M., & Abbaspour-Gilandeh, Y. (2019). Assessment of adaptive neuro-fuzzy inference system and response surface methodology approaches in draft force prediction of subsoiling tines. *Soil and Tillage Research*, 194, 104338. <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.104338>
- Askari, M., Abbaspour-Gilandeh, Y., Taghinezhad, E., El Shal, A. M., Hegazy, R., & Okasha, M. (2021). Applying the response surface methodology (RSM) approach to predict the tractive performance of an agricultural tractor during semi-deep tillage. *Agriculture*, 11, 1043. <https://doi.org/10.3390/agriculture11111043>
- Chuah, L. F., Aziz, A. R. A., Yusup, S., Bokhari, A., Klemeš, J. J., & Abdullah, M.Z. (2015). Performance and emission of diesel engine fueled by waste cooking oil methyl ester derived from palm olein using hydrodynamic cavitation. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 17, 2229-2241. <https://doi.org/10.1007/s10098-015-0957-2>
- Cihan, O. (2021). Experimental and numerical investigation of the effect of fig seed oil methyl ester biodiesel blends on combustion characteristics and performance in a diesel engine. *Energy Reports*, 7, 5846-5856. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2021.08.180>
- Elkelaw, M., Alm-Eldin Bastawissi, H., El Shenawy, E. A., Taha, M., Panchal, H., & Kumar Sadasivuni, K. (2021). Study of performance, combustion, and emissions parameters of DI-diesel engine fueled with algae biodiesel/diesel/n-pentane blends. *Energy Conversion and Management: X*, 10, 100058. <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2020.100058>
- Ghanbari, M., Najafi, G., Ghobadian, B., Mamat, R., Noor, M. M., & Moosavian, A. (2015). Adaptive neuro-fuzzy inference system (ANFIS) to predict CI engine parameters fueled with nano-particles additive to diesel fuel. *3rd International Conference of Mechanical Engineering Research*. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 100: 012070. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/100/1/012070>
- Hosoz, M., Ertunc, H. M., Karabektas, M., & Ergen, G. (2013). ANFIS modelling of the performance and emissions of a diesel engine using diesel fuel and biodiesel blends. *Applied Thermal Engineering*, 60(1-2), 24-32. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2013.06.040>
- Khiraiya, K., Ramana, P. V., Panchal, H., Kumar Sadasivuni, K., Doranehgard, M. H., & Khalid, M. (2021). Diesel-fired boiler performance and emissions measurements using a combination of diesel and palm biodiesel. *Case Studies in Thermal Engineering*, 27, 101324. <https://doi.org/j.csite.2021.101324>
- Lee, S., Yi, E., Cho, Y., & Ahn, K. (2022). The path to a sustainable palm oil futures market. *Energy Reports*, 8, 6543-6550. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.04.048>
- Menacer, B., & Bouchetara, M. (2014). Parametric study of the performance of a turbocharged compression ignition engine. *Simulation*, 90(12), 1375-1384. <https://doi.org/10.1177/0037549714557046>
- Mousavi Seyedi, S. R., Askari, M., & Miri, S. M. R. (2023). Laboratory Investigation of the performance and emissions of biodiesel-diesel fuel blends from rapeseed, soybean and palm oil biodiesels. *Modares Mechanical Engineering*, 23(06), 347-356. <https://doi.org/10.22034/mme.23.6.347>
- Ogunkunle, O., & Ahmed, N. A. (2019a). A review of global current scenario of biodiesel adoption and combustion in vehicular diesel engines. *Energy Reports*, 5, 1560-1579. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2019.10.028>
- Ogunkunle, O., & Ahmed, N. A. (2019b). Performance evaluation of a diesel engine using blends of optimized yields of sand apple (*Parinari polyandra*) oil biodiesel. *Renewable Energy*, 134, 1320-1331. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.09.040>

16. Ogunkunle, O., & Ahmed, N. A. (2020). Exhaust emissions and engine performance analysis of a marine diesel engine fuelled with Parinari polyandra biodiesel-diesel blends. *Energy Reports*, 6, 2999-3007. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2020.10.070>
17. Sayyed, S., Kumar Das, R., & Kulkarni, K. (2021). Performance assessment of multiple biodiesel blended diesel engine and NOx modeling using ANN. *Case Studies in Thermal Engineering*, 28, 101509. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2021.101509>
18. Shafaei, S. M., Loghavi, M., & Kamgar, S. (2019). Prognostication of energy indices of tractor-implement utilizing soft computing techniques. *Information Processing in Agriculture*, 6, 132-149. <https://doi.org/10.1016/j.inpa.2018.08.001>
19. Singh, A., Sinha, Sh., Kumar Choudhary, A., Sharma, D., Panchal, H., & Kumar Sadasivuni, K. (2021). An experimental investigation of emission performance of heterogenous catalyst jatropha biodiesel using RSM. *Case Studies in Thermal Engineering*, 25, 100876. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2021.100876>