مجله مهندسی مکانیک مدرس، مرداد 1396، دوره 17، شماره 5، ص‌ص 363-373

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

تحلیل رگرسیون خطی چندمتغیره برخی پارامترهای عملکردی مهم یک موتور دیزل متداول در شرایط کاری مختلف

مجید رجبی وندچالی[1]، محمدحسین عباسپورفرد[2*]، عباس روحانی[3]

1- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد
2- استاد، مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد
3- استادیار، مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد
* مشهد، کد پستی 9177948978، abaspour@um.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 28 آذر 1395
پذیرش: 26 اسفند 1395
ارائه در سایت: 24 اردیبهشت 1396

کلید واژگان:
رگرسیون خطی چندمتغیره
کدری دود اگزوز
گشتاور
مصرف سوخت
موتور دیزل

چکیده

در حال حاضر، جهان با کاهش روزافزون منابع فسیلی، بحران انرژی و نیز مسائل زیست محیطی مواجه است. از طرفی، موتورهای دیزل به دلیل کاربرد گسترده در بخش‌های مختلف نظیر حمل و نقل، کشاورزی، صنعت و غیره، از منابع اصلی مصرف سوخت و تولید آلاینده هستند. اندازه‌گیری دقیق مصرف سوخت و آلایندگی موتورها مستلزم صرف وقت و هزینه‌ی گزاف برای محققین است. از این رو، هدف اصلی این تحقیق ارائه‌ی مدل‌های رگرسیون خطی مناسب برای برخی پارامترهای عملکردی مهم موتور تراکتور ITM285 بر حسب گشتاور و سرعت موتور بود. آزمایش در 11 سطح سرعت اولیه موتور (779، 921، 1063، 1204، 1346، 1488، 1629، 1771، 1818، 1913 و 2054 rpm) با اعمال گشتاور از صفر تا بار کامل، با گام‌های 10 Nm انجام شد. پارامترهای اندازه‌گیری شامل دبی جرمی مصرف سوخت، دمای اگزوز، سرعت لحظه‌ای موتور، حداکثر و میانگین کدری دود اگزوز بود. چهار مدل رگرسیون خطی مختلف برای برآورد پارامترها مورد استفاده قرار گرفته است. نتایج بررسی کارآیی مدل‌های رگرسیونی نشان داد که برای تمامی پارامترها، مدل رگرسیونی مرتبه دوم دارای بیش‌ترین بازده و کم‌ترین RMSE بود. بیش‌ترین و کم‌ترین تأثیر گشتاور به ترتیب بر دمای اگزوز و سرعت لحظه‌ای موتور بود؛ درحالی‌که این نتیجه برای سرعت اولیه‌ی موتور کاملاً برعکس بود. نتایج ارزیابی مدل‌های رگرسیونی نشان داد که تطابق بالایی بین خروجی مدل‌ها با خروجی مطلوب وجود داشت. هم‌چنین، همبستگی بین دبی جرمی سوخت و دمای اگزوز و نیز بین حداکثر و میانگین کدری دود به ترتیب با ضرائب همبستگی 0.96 و 0.99 در سطح بسیار بالایی قرار داشت.

Multiple linear regression analysis of some important performance parameters of a conventional diesel engine in different working conditions

Majid Rajabi Vandechali, Mohammad Hossein Abbaspour-Fard*, Abbas Rohani

Department of Biosystems Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran
* P.C. 9177948978, Mashhad, Iran, abaspour@um.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 18 December 2016
Accepted 16 March 2017
Available Online 14 May 2017

Keywords:
Multiple linear regression
Exhaust opacity
Torque
Fuel consumption
Diesel engine

ABSTRACT

Nowadays, the world is faced with increasing loss of fossil resources, energy crisis and environmental problems. On the other hand, diesel engines due to wide application in various sectors such as transport, agriculture, industry, etc., are the main sources of emissions and fuel consumption. Accurate measurement of fuel consumption and engine pollution is time-consuming and costly. Hence, the main objective of this study was to develop proper linear regression models of some important performance parameters of ITM285 tractor engine based on engine torque and engine speed. Experiments were carried out in 11 levels of primary engine speed (1063, 1204, 1346, 1488, 1629, 1771, 1818, 1913 and 2054 rpm) by 10 Nm steps of torque from zero (no load) to full load. The measured parameters include fuel consumption mass flow, exhaust temperature, instantaneous engine speed, maximum and mean exhaust opacities. Four different linear regression models were used to estimate the parameters. The results of regression models performance evaluation showed that quadratic model had the highest efficiency and the lowest RMSE for all parameters. The maximum and minimum effects of engine torque were on exhaust temperature and instantaneous engine speed, respectively; while this result was completely reverse for primary engine speed. The results of regression models evaluation showed a high adaptation between the output of each model and the desired output. Also, the fuel mass flow and exhaust temperature were highly correlated to the maximum and mean exhaust opacity with correlation coefficients of 0.96 and 0.99, respectively.

1- مقدمه

در دهه‌های اخیر، جهان وضعیت پرمخاطره‌ای را از لحاظ مصرف سوخت‌های فسیلی نظیر نفت، ذغال‌سنگ، بنزین، سوخت دیزل و غیره را تجربه کرده است؛ به‌طوری که 80 درصد نیاز انرژی جهان از طریق همین منابع فسیلی

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

M. Rajabi Vandechali, M. H. Abbaspour-Fard, A. Rohani, Multiple linear regression analysis of some important performance parameters of a conventional diesel engine in different working conditions, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 5, pp. 363-373, 2017 (in Persian)

تامین می‌شود که 58 درصد آن به تنهایی در بخش حمل و نقل مورد استفاده قرار می‌گیرد [1]. اکنون به خوبی روشن شده است که به دلیل استخراج میلیون‌ها بشکه نفت در روز و محدود بودن منابع نفتی، در آینده‌ای نه‌چندان دور، جهان با بحران کاهش یا حتی اتمام منابع سوخت‌های فسیلی به‌ویژه نفت روبرو خواهد شد [2]. در حال حاضر با توجه به کاهش روزافزون منابع فسیلی و مسئله‌ی بحران انرژی و نیز مسائل زیست محیطی نظیر افزایش گازهای گلخانه‌ای، تخریب لایه‌ی ازن و اختلالات تنفسی در شهرهای بزرگ که بشر با آن گریبان‌گیر است، توجه و تمرکز محققین بر روی مصرف سوخت و آلاینده‌های تولیدی ناشی از احتراق سوخت‌های فسیلی بسیار حائز اهمیت می‌نماید. در این میان، موتورهای دیزل به طور گسترده در خودروها، کشتی-ها، ژنراتورها، تجهیزات نظامی، صنایع سنگین و ماشین‌های کشاورزی به‌ویژه تراکتورها مورد استفاده قرار می‌گیرند. این موتورها نسبت سوخت به توان موثر (مصرف سوخت ویژه[1]) کم‌تری نسبت به موتورهای نوع اشتعال جرقه‌ای[2] دارند [3] و نوسانات کمترشان آن‌ها را برای کاربردهای مداوم، ایمن‌تر می-سازد [4].

اخیراً بیش‌تر تلاش‌ها برای کاهش آلودگی در جهان بر روی موتورهای دیزل متمرکز شده است. آلودگی‌های موتورهای دیزل، ترکیبات پیچیده‌ای هستند که شامل ترکیبات آلی و غیرآلی نظیر دی‌اکسید کربن (CO_2)، مونواکسید کربن (CO)، دی‌اکسید سولفور (SO_2)، اکسیدهای نیتروژن (NO_x)، هیدروکربن‌های نسوخته (UHC)[3] و ذرات ریز معلق در هوا (SPM)[4] می‌باشند [5]. در موتورهای دیزلی، آلاینده‌های NO_x و دوده از اهمیت بیش-تری نسبت به CO و UHC برخوردارند [6]. از ویژگی‌های موتورهای دیزلی، بالا بودن ذرات معلق نسبت به موتورهای بنزینی است. بخش بزرگی از آلاینده‌ی ذرات معلق را ذرات ریز کربن و بخش دیگر آن را هیدروکربن‌ها تشکیل می‌دهند [7]. در ایران احتراق سوخت دیزل تقریباً 80.9 درصد از کل SPM تولیدی، 47.2 درصد از NO_x و 36.4 درصد از دی‌اکسید گوگرد را تولید می‌نماید [6]. بحث آلودگی موتورهای دیزل به دلیل کاربرد گسترده تراکتورها در بخش کشاورزی و در شهرها در وسایل حمل و نقل عمومی و ماشین های سنگین در کارهای عمرانی و ساختمانی و نیز استفاده از این موتورها به صورت موتور پمپ آب و دیزل‌ژنراتور در فضاهای بسته، از اهمیت بسیار بالایی برخوردار است [5].

یکی از راه‌های بیان آلودگی دود اگزوز بیان سطح کدری دود[5] است. شاخص کدری دود در واقع مشخص کننده‌ی میزان غلظت دود می‌باشد. کدری دود ترکیبی از دود سیاه (ذرات دوده)، دود آبی (بخار هیدروکربن) و دود سفید (بخار آب) می‌باشد [8]. کدری دود اگزوز برحسب m^{-1} بیان می-شود. از واحدهای دیگر آن، HSU[6]، BSU[7]، FSN[8] و غیره می‌باشد [9].

تاکنون تحقیقات زیادی به منظور بررسی مصرف سوخت و آلودگی موتورهای دیزل به‌ویژه کدری دود اگزوز انجام شده است. در این تحقیقات عوامل مختلفی نظیر نوع سوخت (دیزل، بیودیزل و ترکیبات آن‌ها)، سرعت موتور، بار موتور، فشار پاشش سوخت، زمان‌بندی پاشش و غیره بر روی پارامترهای عملکردی موتور دیزل نظیر مصرف سوخت، دمای اگزوز، آلاینده-ها، توان ترمزی، فشار محفظه‌ی احتراق و غیره مورد بررسی قرار گرفته است.

آگراوال و همکاران [10] تأثیر بازخورانی دود اگزوز (EGR[9]) بر دمای اگزوز، مصرف سوخت ویژه ترمزی و میزان کدری دود اگزوز در یک موتور دیزل دوسیلندر هوا خنک با پاشش سوخت مستقیم را بررسی کردند. آزمایشات در یک سرعت موتور ثابت (1500 rpm) و با اعمال بارهای مختلف انجام شد. بنابراین، نتایج به دست آمده تنها برای این سرعت موتور معتبرند و قابل تعمیم به سرعت‌های دیگر نیستند. این محققین مهم‌ترین عامل موثر در تشکیل NO_x را دمای احتراق دانسته و دمای اگزوز را در ارتباط مستقیم با تشکیل این نوع آلاینده معرفی نمودند؛ با این استدلال که کاهش دمای اگزوز به معنی کاهش دمای احتراق است. پاشایی هولاسو و همکاران [11] تأثیر سیستم توربوشارژر بر پارامترهای مصرف سوخت موتور، توان و کشش تراکتورهای ITM457، ITM485 و ITM800 را مورد بررسی قرار دادند. سوخت‌سنج مورد استفاده دبی حجمی مصرف سوخت را اندازه می‌گرفت که با ضرب آن در چگالی سوخت، مقدار دبی جرمی مصرف سوخت محاسبه شد. این امر به دلیل تغییر چگالی سوخت با دما، دقت اندازه‌گیری را پایین می-آورد. در تحقیق حاضر، مستقیماً دبی جرمی مصرف سوخت اندازه‌گیری شد تا با مشکل تغییر چگالی سوخت با دما مواجه نشود. برخی محققین، پارامترهای عملکردی موتور دیزل نظیر دمای اگزوز، بازده حرارتی، مصرف سوخت ویژه ترمزی و نیز انتشار آلاینده‌های گازهای خروجی ناشی از بیودیزل حاصل از روغن افتابگردان و سوخت دیزل [12] و ترکیب‌های مختلف بیودیزل ریزجلبک و سوخت دیزل خالص [13] بر روی موتور دیزل را بررسی کرده‌اند. آلاینده‌ها به صورت تفکیک شده اندازه‌گیری شدند اما میزان کدری دود اگزوز، تعیین و مورد بررسی قرار نگرفته است. نتایج حاکی از ارتباط نزدیک بین دمای اگزوز و NOx بود اما بدان اشاره‌ای نشده است و نمودار یا رابطه‌ی رگرسیونی بین این دو پارامتر ارائه نگردیده است. عباس‌زاده و قبادیان [5] تأثیر برخی پارامترهای کاری یک موتور دیزل تک‌سیلندر آب خنک با پاشش مستقیم شامل سرعت دورانی موتور در چهارسطح (1200، 1350، 1500 و 1650 rpm)، بار موتور در چهار سطح (55، 70، 85 و 100 درصد بارکامل) و زاویه پاشش سوخت در پنج سطح (22، 27، 32، 37 و 42 درجه قبل از نقطه مرگ بالا) را بر میزان کدری دود اگزوز بررسی کردند. نتایج نشان داد که بار موتور و زاویه‌ی پاشش سوخت، بیش‌ترین تأثیر را بر روی کدری دود اگزوز داشتند. با توجه به سطوح بار موتور، این نتایج برای بارهای پایین (کم‌تر از 55 درصد بار کامل) معتبر نیست. هم‌چنین منظور از زاویه پاشش سوخت، زاویه مخروط پاشش در سر انژکتور نیست بلکه اشاره به زمان‌بندی پاشش دارد. از این رو، نام‌گذاری زاویه پاشش سوخت برای این عامل چندان مناسب نبود. برخی محققین اثرات مختلف عدد ستان و فشار پاشش سوخت در سرعت‌های مختلف [14]، سرعت موتور و فشار پاشش در وضعیت‌های مختلف دریچه‌ی گاز [15]، فشار پاشش و نوع سوخت در سرعت‌های مختلف موتور در شرایط بار کامل [16] بر پارامترهای عملکردی (مصرف سوخت ویژه، دمای گازهای خروجی، گشتاور و غیره) و آلایندگی موتور دیزل را مورد بررسی و تحلیل قرار داده‌اند. نتایج ارائه شده در این تحقیقات از نظر کیفی مشابه بوده اما از نظر کمّی تفاوت داشته‌اند که احتمالاً به دلیل تفاوت در نوع موتور و نوع سوخت بوده است. نمودارهای ارائه شده همراه با برازش منحنی سیر روند بوده اما نوع منحنی و معادله‌ی رگرسیونی مربوط به آن‌ها ارائه نگردیده است. هم‌چنین برخی از این محققین [16,14] پارامترهای تحقیق را تنها در شرایط بار کامل اندازه‌گیری و ارائه کرده‌اند. بنابراین نتایج برای بارهای پایین‌تر معتبر

1 Specific Fuel Consumption (S.F.C.)
2 Spark Ignition
3 Unburned hydrocarbons
4 Suspended Particulate Matter
5 Opacity
6 Hartridge Smoke Unit
7 Bosch Smoke Unit
8 Filter Smoke Number
9 Exhaust Gas Recirculation

نیست. به طور خلاصه، در اغلب تحقیقات ذکر شده متغیرهای مستقل تنها در زیرمجموعه‌ای از شرایط کاری موتور انتخاب شدند و نتایج به دست آمده قابل برون‌یابی نیست. همچنین تنها به تفسیر نمودارها و مقادیر بحرانی پرداخته شد اما مدل‌های رگرسیونی خطی یا غیرخطی از پارامترها بر حسب متغیرهای مستقل ارائه نگردیده است. از این رو، در این تحقیق سعی بر آن شد تا دامنه‌ی سرعت و گشتاور موتور (متغیرهای مستقل) به گونه‌ای انتخاب شود که از دور آرام تا سرعت حداکثر و از بار صفر (حالت بدون بار) تا بار کامل را در بر گیرد و روابط به دست آمده قابلیت میان‌یابی برای هر شرایطی از کار موتور را دارا باشد.

در پدیده‌های طبیعی و مسائل تجربی، روش‌های متعددی برای تخمین یک پارامتر از روی یک یا چند متغیر وجود دارد. یکی از روش‌ها برای پیش‌بینی رفتار یک متغیر وابسته نسبت به متغیرهای مستقل، مدل رگرسیون خطی چندمتغیره[1] است. رگرسیون خطی نه تنها یکی از قدیمی‌ترین روش‌های پیش‌بینی است بلکه ساده‌ترین روش تشریح شده برای برازش تابع نیز می‌باشد [17]. در رگرسیون خطی، تابع نهایی یک معادله‌ی خطی به فرم $Y=B_0+B_1X_1+B_2X_2+\cdots+B_nX_n$ است که در آن Y متغیر وابسته، B_0 تا B_n ضرائب معادله و X_0 تا X_n متغیرهای مستقل هستند [18]. در صورتی پژوهش‌گر می‌تواند از رگرسیون خطی استفاده کند که شرایط زیر برقرار باشد [19]:

1- میانگین (امید ریاضی) خطاها صفر باشد.

2- واریانس خطاها ثابت باشد.

مفروضات 1 و 2 بدین معنی است که توزیع خطاها باید دارای توزیع نرمال باشد.

3- بین خطاهای مدل، هم‌بستگی وجود نداشته باشد.

4- متغیر وابسته دارای توزیع نرمال باشد.

5- بین متغیرهای مستقل، هم‌خطی وجود نداشته باشد.

اولودامار و همکاران [20] به استخراج مدل رگرسیون خطی تعدادی از پارامترهای عملکردی موتور دیزل بر حسب متغیرهای دیگر پرداختند تا با کاربرد معادلات به دست آمده از رگرسیون، قادر به برآورد پارامترهای عملکردی موتور بدون صرف زمان و انجام آزمایش‌های پرهزینه باشند. به عنوان مثال، در تحقیقی بر روی یک موتور اشتعال تراکمی با سوخت‌های مختلف بیودیزل، صدا و ارتعاش موتور با استفاده از تحلیل رگرسیونی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که ارتعاش و سطح فشار صدا می‌تواند به خوبی و با دقتی قابل قبول، با استفاده از رگرسیون خطی و غیرخطی برآورد شود؛ اما وقتی مدل رگرسیون خطی می‌تواند با دقتی مناسب، متغیر وابسته را برآورد نماید استخراج مدل غیرخطی به دلیل پیچیدگی بیشتر، توجیه مناسبی ندارد و عملاً بی‌فایده است. البته مدل‌های غیرخطی ارائه شده در آن تحقیق به صورت تابع توانی چهارمتغیره به فرم $y=ax_1^bx_2^cx_3^dx_4^e$ (y متغیر وابسته، x_i به قسمی که $i=1,2,3,4$ متغیر مستقل و a، b، c ، d و e اعداد حقیقی‌اند) ارائه شده‌اند. بنابراین با لگاریتم گرفتن از دو طرف رابطه، یک مدل خطی از لگاریتم متغیر وابسته بر حسب لگاریتم متغیرهای مستقل به دست می‌آمد. هرچند، لگاریتم‌گیری از متغیرها زمانی انجام می‌شود که توزیع خطاها نرمال نباشد و یا بین متغیرهای مستقل، هم‌خطی وجود داشته باشد [21]. ابراهیم‌زاده و همکاران [22] مدل عیب‌یابی مکانیکی موتور تراکتور MF399 را با استفاده از آنالیز روغن به دست آوردند که به منظور تعریف مدل، چهار دسته‌ی اصلی عیوب موتور (فرسایش رینگ، پیستون، یاتاقان‌های میل‌لنگ و آستری سیلندر) شناسایی و مورد تحلیل رگرسیونی قرار گرفتند. از نظر این محققین استفاده از مدل‌های رگرسیونی برای عیب‌یابی، مناسب، سودمند و چه بسا ضروری می‌نمود با این توجیه که تجزیه و تحلیل داده‌های حاصل از آزمایش‌های آنالیز روغن، به عنوان کلید عیب‌یابی و شناسایی خرابی‌ها، نیاز به مهارت‌های انسانی دارد که اولاً به راحتی در دسترس نیستند و ثانیاً تحلیل‌های انسانی توأم با خطا می‌باشد. نتایج نشان داد که به جز فرسایش آستری سیلندر با ضریب تبیین تعدیل شده‌ی برابر با 0.48، بقیه مدل‌ها با قابلیت اطمینان بالایی مورد تأیید قرار گرفتند. از پنج مدل ارائه شده در آن تحقیق، سه مدل دارای مقدار ثابت غیرمعنی‌دار در سطح پنج درصد بودند اما محقق به اشتباه آن‌ها را وارد مدل نموده است در حالی که می‌بایست برابر با صفر در نظر بگیرد [21] و از مدل حذف نماید. فلاح و محمدپورفرد [23] پارامترهای موثر در طراحی و بهینه‌سازی لوله‌های خنک‌کن EGR، جهت افزایش بازده موتورهای دیزلی با درنظر گرفتن محدودیت‌های افزایش افت فشار را مورد بررسی قرار دادند.. از روش رگرسیون خطی چند متغیره برای استخراج ضرائب معادله‌ی نظری عدد ناسلت حاکم بر لوله‌ها استفاده شد؛ بدین صورت که از طرفین رابطه‌ی نظری عدد ناسلت، لگاریتم گرفته شد و به صورت خطی در آمد. سپس با استفاده از تحلیل رگرسیونی، ضرائب رابطه‌ی خطی تعیین شدند. محققین برای ارزیابی مدل‌های رگرسیونی، نتایج حاصل از آن را با داده‌های تجربی دیگر محققین مقایسه کرده‌اند و تطابق بسیار خوبی را گزارش نموده‌اند. نتایج حاصل از این تحقیق حاکی از آن است که تحلیل رگرسیون خطی، علاوه بر تخمین و مدل‌سازی پارامترها، ابزاری قدرتمند برای تعیین ضرائب معادلات حاکم بر پدیده‌های فیزیکی برای یک شرایط خاص می‌باشد. نقوی مرادخانلو و همکاران [24] تأثیر میزان سنگین‌کننده در 9 سطح و سرعت پیش‌روی در 2 سطح بر بکسوات، نیروی مالبندی و مصرف سوخت تراکتور ITM285 را مورد بررسی قرار دادند و مدل رگرسیون خطی مصرف سوخت را بر حسب سه متغیر سنگین‌کننده، بکسوات و نیروی مالبندی ارائه داده‌اند. مدل ارائه شده دارای دو ایراد اساسی است: 1- سرعت پیشروی به عنوان متغیر مستقل بوده و اثر آن بر مصرف سوخت بررسی شد اما در مدل رگرسیونی نیامده است و از آن طرف، بکسوات و نیروی مالبندی که خود جزو متغیرهای وابسته بودند، وارد مدل شده‌اند. 2- بکسوات وابسته به نیروی مالبندی است در حالی که در مدل رگرسیونی نباید بین متغیرهای مستقل مدل، وابستگی و هم‌خطی وجود داشته باشد. این از شرایط و مفروضات رگرسیون خطی است و در چنین حالتی یکی از متغیرها باید حذف شود. محققین در مورد مزیت تحلیل رگرسیونی اذعان داشته‌اند که از مدل ارائه شده می‌توان بدون انجام آزمایش‌های پرهزینه‌ی تست کشش و با داشتن میزان سنگین‌کننده و نیروی مالبندی، مصرف سوخت تراکتور را تخمین زد. اما به این نکته توجه ننموده‌اند که اندازه‌گیری نیروی مالبندی بدون انجام تست کشش مقدور نمی‌باشد. چنانچه مدل ارائه شده بر حسب متغیرهای مستقل تحقیق (سنگین‌کننده و سرعت پیشروی) بود هیچ‌یک از ایرادهای نام‌برده قابل طرح نبوده است. به طور خلاصه، مزایای ارائه‌ی چنین مدل‌هایی جلوگیری از انجام آزمایش‌های پرهزینه و زمان‌بر است [25] و در مواقعی که ابزارهای دقیق برای اندازه‌گیری برخی از پارامترها نظیر آلاینده‌ها، مصرف سوخت، نیروی کشش و غیره در دست نباشد وجود چنین مدل‌هایی بسیار کارآمد و راهگشا خواهد بود. همچنین مدل‌های رگرسیونی به دلیل فرموله کردن متغیر و ارائه‌ی رابطه‌ی ریاضی، برای بهینه‌سازی و پیدا کردن نقاط بحرانی یا اکسترمم، بسیار

[1] Multiple linear regression

سودمند می‌باشند. ایراد اصلی و اساسی مدل‌های تخمینی آن است که این مدل‌ها خاصیت درون‌یابی دارند و همچنین تنها برای شرایطی خاص (شرایط آزمایش) معتبرند و قابل تعمیم به شرایط دیگر نیستند.

در حال حاضر تراکتورها به‌ویژه مدل ITM285 (تراکتور متداول بسیاری از مناطق کشور) به طور گسترده‌ای در بسیاری از عملیات کشاورزی و در تجهیزات ثابت زراعی و باغی مورد استفاده قرار می‌گیرد. در سال 1381 حدود 95 درصد قسمت‌های مختلف تراکتور ITM285 در ایران ساخته شده و اکنون این تراکتور توسط شرکت تراکتورسازی ایران تولید و عرضه می‌شود [24]. ادوات کشاورزی نظیر خاک‌ورزهای فعال[1] (مثل روتیواتورها، سیکلوتیلرها و غیره)، بسته بندها، چاپرها، کمباین‌های کششی، سمپاش‌ها، کودپاش‌ها و غیره و نیز تجهیزات ثابت زراعی و باغی نظیر کاه‌خردکن‌ها، سرشاخه‌خردکن-ها و غیره، همگی از محور توان‌دهی[2] تراکتور نیرو می‌گیرند. اندازه‌گیری و آگاهی از برخی پارامترهای عملکردی مهم موتور در بارها و سرعت‌های دورانی مختلف (صرف نظر از این که چه وسیله‌ای به تراکتور متصل می‌شود) و در دست داشتن مدل‌های رگرسیونی خطی مناسب از این پارامترها، برای مهندسین به منظور طراحی، برای کارشناسان مزرعه به منظور مدیریت و تصمیم‌گیری صحیح در کاربرد تراکتور و ماشین و ایجاد تناسب بین آن‌ها و برای محققین به دلیل صرفه‌جویی در هزینه و زمان انجام آزمایش‌ها، از اهمیت بسزایی برخوردار است. تاکنون هیچ مدل رگرسیونی خطی برای پارامترهای مهمی نظیر دبی جرمی مصرف سوخت، کدری دود اگزوز و غیره بر حسب گشتاور و سرعت دورانی موتور توسط محققین ارائه نشده است. از این رو، با توجه به بررسی منابع و بیان مسئله ذکر شده و نیز اهمیت موضوع بحران انرژی و مسائل زیست محیطی، هدف اصلی این تحقیق ارائه‌ی مدل-های رگرسیونی خطی مناسب و قابل اعتماد برای برخی پارامترهای عملکردی مهم موتور تراکتور ITM285 بر حسب گشتاور و سرعت موتور بود. علاوه بر ارائه‌ی این مدل‌های خطی، نوآوری‌های دیگر این تحقیق عبارتند از: 1- مستقل بودن مدل‌ها از نوع دستگاهی که به تراکتور متصل می‌شود و از موتور توان دریافت می‌کند. این مدل‌ها برای هر وسیله‌ی کشاورزی یا حتی غیر کشاورزی که از موتور نام‌برده توان دورانی دریافت می‌کند، معتبر است. 2- دامنه‌ی گسترده‌ی متغیرهای مستقل به طوری که هر مدل، از دور آرام تا سرعت حداکثر موتور و نیز از بار صفر تا بار کامل را در بر می‌گیرد و پارامترهای مدل‌سازی شده، قابل درون‌یابی برای تمامی شرایط کاری موتور می‌باشند. 3- تخصیص بخشی از داده‌های تحقیق برای اعتبارسنجی مدل‌ها. این امر تاکنون در هیچ‌یک از مدل‌سازی‌های رگرسیونی توسط محققین انجام نشده است و از تمامی داده‌ها برای برآورد مدل استفاده نموده‌اند.

2- مواد و روش‌ها

2-1- مشخصات موتور

آزمایش در دانشگاه فردوسی مشهد، گروه مهندسی بیوسیستم، بر روی موتور تراکتور ITM285 ساخت شرکت تراکتورسازی ایران انجام شد. قبل از انجام آزمایش، فیلترها و روغن موتور تعویض شد. سپس، آزمون‌های مقدماتی برای کنترل کارکرد تجهیزات مورد استفاده در آزمون و اطمینان از آماده بودن موتور برای انجام آزمایشات اصلی انجام شد [26]. مشخصات فنی موتور مورد استفاده در جدول 1 آمده است.

[1] Active tillage tools
[2] Power Take Off (PTO)

جدول 1 مشخصات فنی موتور مورد استفاده

Table 1 Technical characteristics of the used engine

نوع موتور	پرکینز، چهار سیلندر، چهار زمانه
سال ساخت	1384
قطر سیلندر	101 mm
کورس پیستون	127 mm
نسبت تراکم	16:1
نوع سوخت	سوخت دیزل
نوع پمپ انژکتور	ردیفی
سیستم احتراق	تزریق مستقیم
حداکثر قدرت	75 hp در سرعت موتور 2000 rpm
سرعت محور توان‌دهی	540 rpm در سرعت موتور 1818 rpm

2-2- مشخصات آزمایش

آزمایش در 11 سطح سرعت اولیه موتور (N_p) شامل: 779، 921، 1063، 1204، 1346، 1488، 1629، 1771، 1818 (سرعت مشخصه‌ی موتور)، 1913 و 2054 rpm انجام شد. در هر آزمایش، محور توان‌دهی تراکتور با استفاده از اتصال چهارشاخه گردان به دینامومتر متصل و راه‌اندازی گردید. سپس سرعت موتور در سطح موردنظر ثابت شد و قبل از انجام آزمایش، موتور به مدت 10 دقیقه کار کرد تا گرم شود [3]. در عملیات زراعی و باغی عمدتاً با استفاده از گاز دستی تراکتور، موتور در وضعیت دریچه گاز ثابت قرار می‌گیرد؛ از این رو در انجام آزمایشات، وضعیت استقرار دریچه‌ی گاز موتور در تمام مدت اعمال بار در سرعت موردنظر، بدون تغییر بود [27]. در هر سطح سرعت اولیه موتور، اعمال گشتاور (T) از صفر (حالت بدون بار) شروع و با گام‌های 10 Nm تا بار کامل ادامه یافت. با افزایش گشتاور، سرعت موتور مدام کم می‌شد. از این رو سرعت موتور در بار صفر، سرعت اولیه و در طی آزمایش (تا بار کامل) سرعت لحظه ای نامیده شد. نمای بستر آزمون در شکل 1 آمده است. پارامترهای اندازه‌گیری شامل دبی جرمی مصرف سوخت، دمای گازهای خروجی موتور، سرعت لحظه‌ای موتور، حداکثر کدری دود اگزوز و میانگین کدری دود اگزوز بود. آزمایشات در محدوده‌ی دمای هوای محیط 7±23 درجه سانتی‌گراد انجام شد [28].

2-3- اندازه‌گیری پارامترها

برای اعمال بار دورانی به موتور از یک دینامومتر اصطکاکی- هیدرولیکی با گردش آب، مدل پلینت[3] ساخت کشور انگلستان با حدکثر ظرفیت بارگذاری 325 Nm استفاده شد (شکل 1). تجهیزات اندازه‌گیری پارامترها در شکل 2 و شکل شماتیکی بستر آزمون در شکل 3 نشان داده شده است. ثبت داده‌ها پس از پایداری در مقادیر تجهیزات اندازه‌گیری در هر نقطه‌ی جدید از شرایط کاری موتور (گشتاور و سرعت) انجام شد [26]. دینامومتر مجهز به یک نیروسنج[4] با ظرفیت 100 کیلوگرم بود که مقادیر نیروی اعمالی را به رایانه ارسال می‌کرد که با ضرب آن در بازوی گشتاور (0.365 m) تبدیل به گشتاور می‌شد. قبل از انجام آزمایش، دینامومتر توسط وزنه‌های استاندارد ضمیمه‌ی دستگاه (دو وزنه‌ی 50 Nm و دو وزنه‌ی 75 Nm) در حالت استاتیکی کالیبره گردید. سرعت دینامومتر نیز توسط یک سرعت‌سنج[5] نوری کالیبره شد. مقادیر سرعت و گشتاور دینامومتر توسط یک مدار الکترونیکی واسط، دریافت و به صورت دیجیتالی وارد رایانه شده و بر روی نمایش‌گر رایانه نشان داده

[3] PLINT
[4] Load cell
[5] Tachometer

Fig. 1 The overall view of the test setup.

شکل 1 نمای بستر آزمون.

Fig. 2 The instrumentations for parameters measurements: 1- Digital scale to measure fuel consumption, 2- Diesel emission tester, 3- Temperature monitor and sensor, 4- Emission probe and 5- Load cell.

شکل 2 تجهیزات اندازه‌گیری پارامترها: 1- ترازوی دیجیتالی برای اندازه‌گیری مصرف سوخت، 2- دستگاه تست آلاینده‌ی دیزل، 3- نمایش‌گر و حسگر دما، 4- پروب اندازه گیری دود و 5- لودسل.

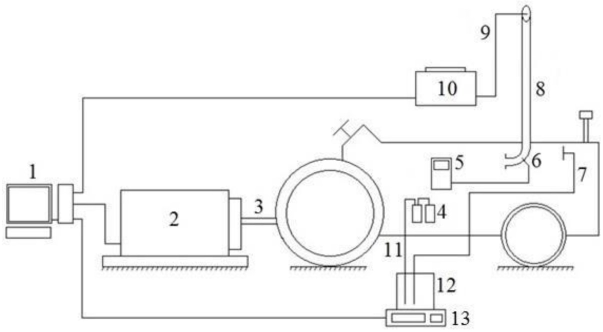

Fig. 3 Schematic of the test bed: 1- Data acquisition system, 2- Dynamometer, 3- Transmission shaft, 4- Primary fuel filters, 5- Temperature monitor, 6- Temperature sensor, 7- Fuel return pipe, 8- Tractor exhaust, 9- Emission measurement probe, 10- Diesel emission tester, 11- Fuel inlet pipe, 12- Fuel container and 13- Digital scale.

شکل 3 طرح‌واره‌ی بستر آزمون و تجهیزات مورد استفاده: 1- سامانه‌ی جمع‌آوری داده‌ها، 2- دینامومتر، 3- میل گردان، 4- فیلترهای اولیه‌ی سوخت، 5- نمایش‌گر دما، 6- حسگر دما، 7- لوله‌ی برگشت سوخت، 8- اگزوز، 9- لوله‌ی عبور دود، 10- دستگاه تست آلاینده‌ی دیزل، 11- لوله‌ی ورودی سوخت، 12- ظرف سوخت و 13- ترازوی دیجیتالی.

می‌شد. نسبت تبدیل سرعت موتور به سرعت دینامومتر 1:1.2 بود که با تقسیم مقادیر سرعت دینامومتر به عدد 1.2 مقادیر سرعت موتور مشخص گردید. برای تنظیم دقیق سرعت اولیه موتور در سطح موردنظر، ارتباط گاز دستی تراکتور از پمپ انژکتور قطع گردید و تنظیم سرعت موتور با استفاده از یک پیچ تنظیم بر روی اهرم شانه‌ی گاز پمپ انژکتور انجام شد.

مقادیر مصرف سوخت مایع باید همان طور که سوخت به سیستم تغذیه می‌شود، مستقیماً به صورت وزنی اندازه‌گیری شوند. اندازه‌گیرهای حجمی برای تعیین مقادیر مصرف سوخت نباید استفاده شوند و چنانچه در شرایط خاص به کار روند باید تصحیحات دمایی[1] اعمال گردند [26]. در روش حجمی، مقادیر حجم سوخت مصرفی در مقدار چگالی سوخت در دمای 15 درجه‌ی سانتی‌گراد ضرب می‌شود؛ از این رو، تغییرات چگالی سوخت با دما نیز باید مود توجه قرار گیرد [28]. در این تحقیق با توجه به ایستگاهی بودن آزمایشات، برای اندازه‌گیری دبی جرمی مصرف سوخت تراکتور از یک ترازوی دیجیتالی ساخت شرکت A&D ژاپن با دقت 0.01± گرم و ظرفیت 6 کیلوگرم استفاده شد (شکل 2). صحت کارکرد ترازو توسط وزنه‌های استاندارد توزین بررسی و تأیید شد. باک سوخت از مدار سوخت‌رسانی خارج و یک ظرف سوخت بر روی ترازو قرار داده شد. سوخت توسط یک لوله‌ی پلاستیکی رابط از ظرف به فیلترهای اولیه‌ی سوخت می‌رسید و لوله‌ی دیگری، سوخت اضافی سر انژکتورها را به ظرف برمی‌گرداند (شکل 3). آرایش ظرف سوخت و تمامی لوله‌ها و اتصالات به گونه‌ای بود که بجز ظرف سوخت، چیز دیگری بر مشاهدات وزنی تأثیر نگذارد [26]. عدد ترازو با فرکانس نمونه‌برداری 5 هرتز ثبت گردید. سپس نمودار پراکندگی مقادیر به دست آمده در نرم‌افزار اکسل[2] رسم و با برازش خط سیر روند بر روی آن، دبی جرمی مصرف سوخت (شیب خط) بر حسب گرم بر ثانیه به دست آمد.

برای اندازه‌گیری کدری دود اگزوز از دستگاه تست آلاینده‌ی دیزل ماها[3] مدل MDO2-LON ساخت کشور آلمان [25] استفاده شد (شکل 2). قبل از انجام آزمایش، دستگاه توسط شرکت توان‌سازان ایران برای مدت 180 روز کالیبره شد. این دستگاه، کدری دود اگزوز را بر حسب m^{-1} اندازه‌گیری و ثبت می‌نمود و در پایان هر آزمایش، مقدار حداکثر کدری دود را در طی آن آزمایش نشان می‌داد.

برای اندازه‌گیری دمای گازهای خروجی موتور در گلویی اگزوز که از این پس دمای اگزوز نامیده می‌شود، از یک حسگر دمای سری K [25] با قابلیت اندازه‌گیری دما تا $700\ ^{o}C$ و یک نمایش‌گر دما ساخت شرکت لوترون[4] مدل TM-902C با قابلیت نمایش دما از -50 تا $1300\ ^{o}C$ و تفکیک‌پذیری $1\ ^{o}C$ استفاده شد (شکل 2). برای اطمینان از درستی کارکرد حسگر دما از دمای مخلوط اشباع آب و یخ ($0\ ^{o}C$) و دمای آب در حال جوش در فشار یک اتمسفر ($99.62\ ^{o}C$) [29]، استفاده شد. برای نصب حسگر دما بر روی موتور، گلویی اگزوز سوراخ گردید [16] و مهره‌ای بر روی آن جوش داده شد. با بستن پایه‌ی حسگر به مهره، سر آن به طور کامل وارد گلویی می‌شد (شکل 2). انتخاب گلویی اگزوز برای نصب حسگر دما به این دلیل بود که اولاً گازهای خروجی از تمامی سیلندرها از این نقطه عبور می‌کرد و دوماً این نقطه نزدیک‌ترین نقطه به منیفولد دود بوده و حداقل افت دمای دود در آن اتفاق می‌افتاد. محل نصب به طور جزیی‌تر، در وسط انحنای گلویی انتخاب شد زیرا در این نقطه، دود برای تغییر مسیر از حالت افقی به حالت عمودی در اثر نیروی گریز از مرکز مماس بر جداره‌ی گلویی اگزوز حرکت می‌کرد و حسگر را به طور کامل در بر می‌گرفت (شکل 3).

[1] Temperature corrections
[2] Excel
[3] MAHA
[4] Lutron

2-4- تحلیل داده‌ها و استخراج مدل‌ها

مدل‌های رگرسیونی که برای تخمین پارامترها مورد استفاده قرار گرفتند در روابط 1 تا 4 نشان داده شده است [25].

$$\text{خطی}: y = \beta_0 + \beta_1 N_p + \beta_2 T + \varepsilon \quad (1)$$

$$\text{متقابل دوفاکتوره (2FI)}: y = \beta_0 + \beta_1 N_p + \beta_2 T + \beta_3 N_p T + \varepsilon \quad (2)$$

$$\text{مرتبه دوم}: y = \beta_0 + \beta_1 N_p + \beta_2 T + \beta_3 N_p T + \beta_4 N_p^2 + \beta_5 T^2 + \varepsilon \quad (3)$$

$$\text{مرتبه دوم کاهش یافته}: y = \beta_0 + \beta_1 N_p + \beta_2 T + +\beta_3 N_p^2 + \beta_4 T^2 + \varepsilon \quad (4)$$

که در آن‌ها؛ N_p، سرعت اولیه موتور بر حسب rpm؛ T، گشتاور موتور بر حسب Nm؛ y، متغیر وابسته (دبی جرمی مصرف سوخت، دمای اگزوز، سرعت لحظه‌ای موتور، حداکثر کدری اگزوز و میانگین کدری دود اگزوز به ترتیب بر حسب gs^{-1}، ^oC، rpm، m^{-1} و m^{-1}) و β_i به قسمی که i=0,1,2,3,4,5 ضرائب مدل‌های رگرسیونی می‌باشند.

تجزیه واریانس مدل رگرسیون خطی چندمتغیره در جدول 2 نشان داده شده است. واریانس کل مدل به دو جزء اصلی شامل مجموع مربعات رگرسیون (SS_R) و مجموع مربعات خطا (SS_E) تقسیم شده است. از آزمون F برای بررسی معنی‌داری مدل استفاده شده است. علاوه بر این، معنی‌داری ضرائب مدل برازش شده با استفاده از آماره‌ی t ارزیابی گردیده است [25].

2-5- معیارهای ارزیابی عملکرد مدل

داده‌ها به طور تصادفی به دو بخش داده‌های آموزش و تست تقسیم شدند. 80 درصد داده‌ها برای آموزش و 20 درصد داده‌ها برای تست مدل‌ها در نظر گرفته شد. برای ارزیابی مدل‌های رگرسیونی از معیارهای جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) و بازده‌ی مدل (EF) برای داده‌های آموزش و تست استفاده شده است. برای هر پارامتر، مدلی که کم‌ترین RMSE و بیش‌ترین بازده را دارا بود انتخاب گردیده و مورد تجزیه واریانس قرار گرفته است. سپس تبدیلات مختلف نظیر لگاریتم، رادیکال، معکوس و غیره بر هر پارامتر اعمال گردیده و مدل مناسب استخراج شده است. انتخاب مدل مناسب بر اساس رسم نمودار پراکندگی مقادیر پیش‌بینی شده در برابر مقادیر واقعی در اطراف نیمساز ربع اول (خط $y=x$) انجام شده است [25].

تفکیک و تحلیل داده‌ها، استخراج مدل‌های رگرسیونی و ارزیابی مدل‌ها با استفاده از نرم‌افزار متلب نسخه‌ی R2016b و رسم نمودارهای پراکندگی توسط نرم‌افزار اکسل نسخه‌ی 2010 انجام شد.

3- نتایج و بحث

3-1- هم‌بستگی بین متغیرها

نتایج بررسی هم‌بستگی بین متغیرها (مستقل و وابسته) بر اساس ضریب هم‌بستگی پیرسون در جدول 3 آمده است. بیلگیلی و ساهین [18] نیز از همین آزمون برای بررسی هم‌خطی متغیرهای وابسته‌ی پژوهش استفاده کردند. بیش‌ترین و کم‌ترین ضریب هم‌بستگی پیرسون به دست آمده در آن پژوهش به ترتیب برابر 0.936 و 0.0075 (هر دو با علامت منفی) بود. نتایج آزمون هم‌خطی نشان داد که بین تمام زوج متغیرهای وابسته هم‌خطی معنی‌داری در سطح یک درصد وجود داشت. مقدار ضریب هم‌بستگی پیرسون بین دبی جرمی سوخت و دمای اگزوز و نیز بین حداکثر و میانگین کدری دود اگزوز به ترتیب با مقادیر 0.96 و 0.99 در سطح بالایی قرار داشت اما در دیگر زوج‌ها مقدار این ضریب کم‌تر از 0.60 بود که چندان مناسب نیست (جدول 6). عباس زاده و قبادیان [5] تأثیر مثبت و معنی‌دار سرعت موتور بر میزان کدری دود اگزوز را گزارش داده‌اند اما این تأثیر در بارهای پایین، قابل ملاحظه نبود. بین سرعت اولیه موتور و پارامترهای کدری دود اگزوز رابطه‌ی معنی‌داری در سطح احتمال یک درصد وجود نداشت. نمودار پراکندگی دبی جرمی مصرف سوخت در برابر دمای اگزوز و نمودار میانگین در برابر حداکثر کدری دود در شکل 4 نشان داده شده است. رابطه‌ی خطی بین دو متغیر به همراه ضریب تبیین مربوطه نمایش داده شده است (شکل 4). این ضریب تبیین در واقع همان مربع ضریب همبستگی نشان داده شده در جدول 3 است.

جدول 2 تجزیه واریانس مدل رگرسیونی

Table 2 Analysis of variance table for the regression model

منبع تغییر	درجه آزادی	مجموع مربعات	میانگین مربعات	آماره F
رگرسیون	p-1	$SS_R = \sum_{i=1}^{n}(\hat{y}_i - \bar{y})^2$	$MS_R = \frac{SS_R}{p-1}$	$F = \frac{MS_R}{MS_E}$
خطا	n-p	$SS_E = \sum_{i=1}^{n}(y_i - \hat{y}_i)^2$	$MS_E = \frac{SS_E}{n-p}$	
کل	n-1	$SS_T = \sum_{i=1}^{n}(y_i - \bar{y})^2$		

n: تعداد تکرار؛ p: تعداد پارامترها؛ y: مقدار تجربی پارامتر؛ $\hat{y}$: مقدار پیش‌بینی شده توسط مدل

3-2- انتخاب مدل رگرسیونی مناسب

نتایج بررسی کارآیی هر یک از مدل‌های رگرسیونی نشان داده شده در روابط 1 تا 4 برای هر پارامتر در جدول 4 آمده است. برای تمامی پارامترها، مدل رگرسیونی مرتبه دوم دارای بیشترین بازده و کم‌ترین RMSE هم برای داده-های آموزش و هم برای داده‌های تست بود (جدول 4). ثابت سروستانی و همکاران [25] نتیجه‌ی مشابه را برای مصرف ویژه سوخت ترمزی و آلاینده-های موتور دیزل به جز کدری دود گزارش داده‌اند. مدل رگرسیونی مناسب برای کدری دود در آن تحقیق، مدل 2FI بود.

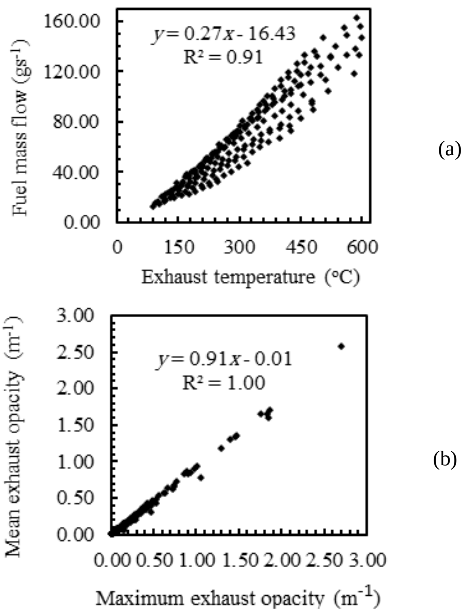

Fig. 4 Plot of a) Fuel mass flow versus exhaust temperature and b) Mean opacity versus maximum exhaust opacity

شکل 4 نمودار a) دبی جرمی سوخت در برابر دمای اگزوز و b) میانگین کدری دود در برابر حداکثر کدری دود اگزوز

جدول 3 نتایج آزمون هم‌خطی متغیرها (ضریب هم‌بستگی پیرسون)

Table 3 Results of linearity test of variables (Pearson correlation coefficient)

	N_p	T	دبی جرمی سوخت	دمای اگزوز	سرعت لحظه‌ای موتور	حداکثر کدری دود اگزوز
T	0.18**	1				
دبی جرمی سوخت	0.64**	0.85**	1			
دمای اگزوز	0.44**	0.95**	0.96**	1		
سرعت لحظه‌ای موتور	0.98**	0.01ns	0.51**	0.28**	1	
حداکثر کدری دود اگزوز	-0.12ns	0.63**	0.41**	0.59**	-0.24**	1
میانگین کدری دود اگزوز	-0.11ns	0.63**	0.41**	0.60**	-0.23**	0.99**

ns و ** به ترتیب، معنی دار نبودن در سطح احتمال پنج درصد و معنی‌داری در سطح احتمال یک درصد (دوطرفه)

جدول 4 مقادیر معیارهای عملکرد برای هر یک از مدل‌های رگرسیونی

Table 4 The values of performance criteria for each of the regression models

مدل	دبی جرمی مصرف سوخت				دمای اگزوز				سرعت لحظه‌ای موتور			
	Train		Test		Train		Test		Train		Test	
	RMSE	EF	RMSE	EF	RMSE	EF	RMSE	EF	RMSE	EF	RMSE	EF
Linear	3.39	99.75	3.68	99.80	12.78	99.02	11.34	99.00	23.75	99.99	24.21	99.99
2FI	2.23	99.89	2.84	99.58	12.68	99.58	10.61	99.68	22.36	99.99	22.20	99.99
Quadratic	1.57	99.99	2.01	99.99	9.80	99.99	7.67	99.89	20.16	99.99	18.68	99.99
Red. Quadratic	2.53	99.99	2.78	99.87	11.44	99.89	9.61	99.87	22.88	99.99	22.06	99.99
	حداکثر کدری دود اگزوز				میانگین کدری دود اگزوز							
Linear	0.32	53.29	0.19	65.88	0.29	53.35	0.17	65.25				
2FI	0.30	59.87	0.16	75.51	0.28	58.16	0.14	76.35				
Quadratic	0.19	83.59	0.06	97.47	0.18	83.69	0.05	96.35				
Red. Quadratic	0.26	70.25	0.15	79.47	0.24	70.25	0.13	79.87				

3-3- تجزیه واریانس مدل‌ها

جدول تجزیه واریانس مدل رگرسیونی درجه دوم مربوط به هر پارامتر در جدول 5 آمده است. هم‌چنین رویه‌ی پاسخ برآورد شده برای هر پارامتر در برابر گشتاور و سرعت اولیه موتور در شکل 5 نشان داده شده است. تمامی مدل‌های رگرسیونی و اجزای آن‌ها به جز اثر مربع گشتاور بر سرعت لحظه‌ای موتور، در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار شدند (p-value<0.01). با اعمال تبدیلات مختلف بر روی متغیرهای وابسته، مناسب‌ترین تبدیل برای تمامی پارامترها تبدیل رادیکالی با فرجه‌ی دوم بود. مدل‌های رگرسیونی پارامترها در روابط 5 تا 9 آمده است که در آن‌ها؛ N_p، سرعت اولیه موتور؛ T، گشتاور موتور؛ FMF، دبی جرمی مصرف سوخت؛ ET، دمای اگزوز؛ $IRPM$، سرعت لحظه‌ای موتور؛ MEO، حداکثر کدری اگزوز و $MEEO$، میانگین کدری دود اگزوز؛ به ترتیب بر حسب rpm، Nm، gs^{-1}، ^{o}C، rpm، m^{-1} و m^{-1} می‌باشند.

$$\sqrt{FMF} = 2.38 + 0.99 \times 10^{-3}N_p + 0.02T + 7.21 \times 10^{-6}N_pT + 0.56 \times 10^{-3}N_p^2 - 0.02 \times 10^{-3}T^2 \quad (5)$$

$$\sqrt{ET} = 10.48 - 1.99 \times 10^{-3}N_p + 0.07T - 10.71 \times 10^{-6}N_pT + 1.94 \times 10^{-6}N_p^2 + 15.44 \times 10^{-6}T^2 \quad (6)$$

$$\sqrt{IRPM} = 14.99 + 17.22 \times 10^{-3}N_p - 24.17 \times 10^{-3}T + 6.87 \times 10^{-6}N_pT - 1.15 \times 10^{-6}N_p^2 - 9.28 \times 10^{-6}T^2 \quad (7)$$

$$\sqrt{MEO} = 1.05 - 1.38 \times 10^{-3}N_p + 5.29 \times 10^{-3}T - 5.63 \times 10^{-6}N_pT + 0.54 \times 10^{-6}N_p^2 + 0.04 \times 10^{-3}T^2 \quad (8)$$

$$\sqrt{MEEO} = 0.94 - 1.23 \times 10^{-3}N_p + 4.87 \times 10^{-3}T - 5.27 \times 10^{-6}N_pT + 0.48 \times 10^{-6}N_p^2 + 41.18 \times 10^{-6}T^2 \quad (9)$$

جدول 5 تجزیه واریانس مدل‌های رگرسیونی و اجزای آن‌ها

Table 5 ANOVA of the regression models and their components

منبع تغییر	درجه آزادی	مجموع مربعات				
		دبی جرمی سوخت	دمای اگزوز	سرعت لحظه ای موتور	حداکثر کدری دود اگزوز	میانگین کدری دود اگزوز
مدل	5	813.30**	2176.95**	4598.40**	13.85**	13.13**
N_p	1	353.57**	424.61**	4480.43**	0.34**	0.31**
T	1	454.68**	1741.03**	113.75**	10.03**	9.65**
$N_p.T$	1	3.59**	2.45**	1.11**	0.63**	0.55**
N_p^2	1	0.94**	8.54**	2.99**	0.36**	0.27**
T^2	1	0.51**	0.33*	0.12ns	2.50**	2.35**
خطا	156	1.44	9.66	15.58	1.73	1.68
کل	161	814.75	2186.62	46.13	15.58	14.82

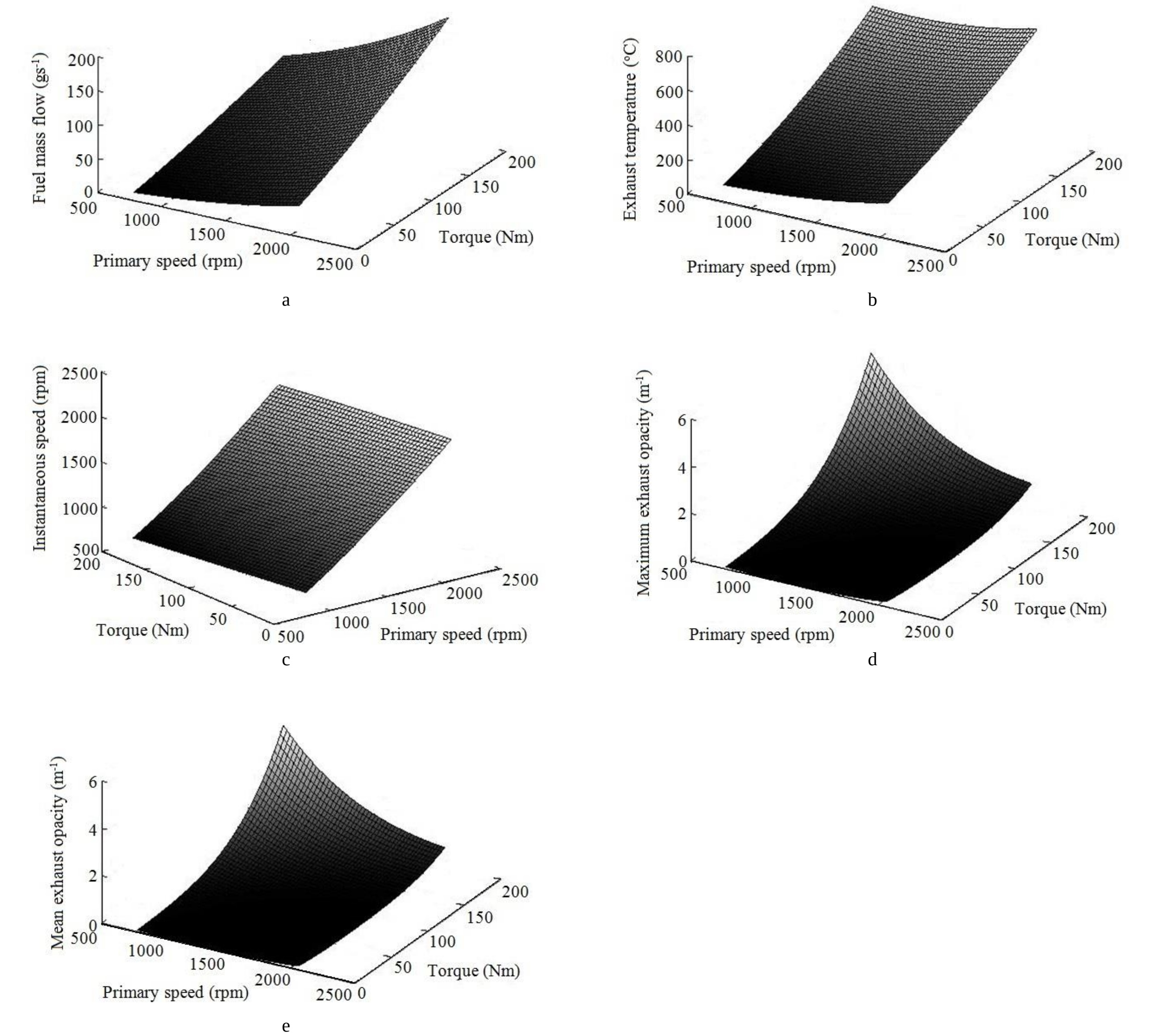

Fig. 5 Plots of a) Fuel mass flow, b) Exhaust temperature, c) Instantaneous engine speed, d) Maximum exhaust opacity and e) Mean exhaust opacity, versus torque and primary engine speed

شکل 5 نمودار پارامترهای a) دبی جرمی سوخت، b) دمای اگزوز، c) سرعت لحظه‌ای موتور، d) حداکثر کدری دود و e) میانگین کدری دود، در برابر گشتاور و سرعت اولیه موتور

از آن جا که احتراق موتور و پارامترهای عملکردی آن تحت تأثیر نوع اقلیم و شرایط اتمسفری منطقه می‌باشند، روابط حاصله برای منطقه مشهد و نیز مناطق با اقلیم مشابه (گرم و خشک) و در شرایط جوی ذکر شده معتبرند و قابل تعمیم به شرایط و اقلیم‌های دیگر نیستند. نقوی مرادخانلو و همکاران [24] دو مدل رگرسیون خطی سه‌متغیره برای مصرف سوخت موتور تراکتور ITM285 بر حسب بکسوات، نیروی مالبندی و میزان سنگین‌کننده‌ها با ضرائب تبیین 0.930 و 0.940 به دست آوردند.

روند تغییر دبی جرمی سوخت نسبت به افزایش گشتاور در تمامی سرعت‌های اولیه موتور، پیوسته صعودی بود (شکل 5-a). با افزایش گشتاور، توان مصرف شده (انرژی مصرفی در واحد زمان) افزایش یافت و این امر مستلزم آزاد شدن انرژی بیش‌تر در فرآیند احتراق (مصرف سوخت بیش‌تر) بود. از طرفی، سرعت موتور با افزایش گشتاور کاهش یافت (شکل 5-c) که منجر به تعداد چرخه‌های احتراق کمتری در واحد زمان گردید. بنابراین، موتور می‌بایست انرژی بیشتری را در تعداد احتراق کمتر، آزاد نماید و احتمالاً همین امر منجر به افزایش دبی جرمی مصرف سوخت گردید. با افزایش گشتاور، دمای اگزوز نیز دارای روندی پیوسته صعودی و مشابه با دبی جرمی سوخت بوده است (شکل 5-b). در واقع دمای اگزوز، متأثر از دمای احتراق و آن نیز متأثر از انرژی آزاد شده در فرآیند احتراق (میزان مصرف سوخت) است. احتمالاً به همین دلیل دمای اگزوز و دبی جرمی سوخت نسبت به تغییر گشتاور دارای روند تغییر مشابه بوده‌اند. آگراوال و همکاران [10] نیز افزایش دمای اگزوز را با افزایش بار موتور گزارش داده‌اند. یکی از آلاینده‌های مهم موتورهای احتراق داخلی، NO_x است که متأثر از دمای احتراق می‌باشد. فلاح و محمدپور فرد [6] اذعان داشته‌اند که تشکیل NO_x در محفظه احتراق، حساسیت زیادی به تغییرات دمایی محفظه احتراق دارد و افزایش دمای

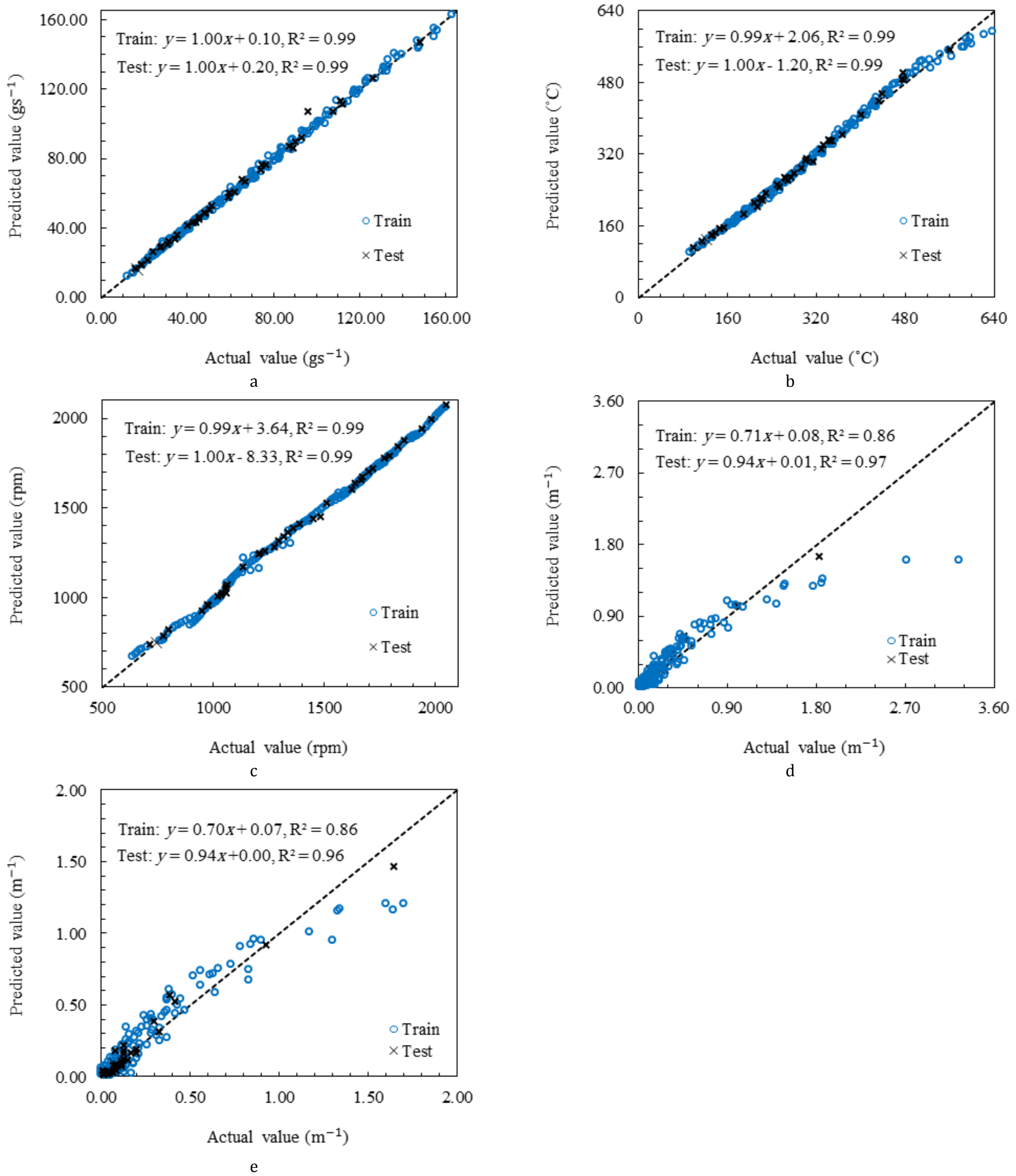

Fig. 6 Plot of actual values versus predicted values of a) Fuel mass flow, b) Exhaust temperature, c) Instantaneous engine speed, d) Maximum exhaust opacity and e) Mean exhaust opacity

شکل 6 نمودار مقادیر واقعی در برابر مقادیر پیش‌بینی شده برای a) دبی جرمی سوخت، b) دمای اگزوز، c) سرعت لحظه‌ای موتور، d) حداکثر کدری دود اگزوز و e) میانگین کدری دود اگزوز

موتور تأثیر منفی در تشکیل این آلاینده داشته و باعث افزایش آن می‌شود. برخی محققین با استناد به این امر که تشکیل NO_x شدیداً تحت تأثیر دمای احتراق است و از طرفی، دمای احتراق مستقیماً بر روی دمای اگزوز تأثیر می‌گذارد، از این رو دمای اگزوز را به عنوان معیاری از این آلاینده معرفی نموده‌اند [10]. نتایج نشان داد که با افزایش گشتاور، دمای اگزوز با شیبی تند افزایش یافته است (شکل 5-b) در حالی که این امر در مورد سرعت لحظه‌ای موتور، ناچیز بوده و روندی کاهشی با شیب ملایم (شکل 5-c) داشته است. در مورد تأثیر سرعت اولیه موتور بر پارامترها، نتیجه‌ای عکس گشتاور به دست آمده به طوری که بیشترین تأثیر آن بر پارامتر سرعت لحظه‌ای موتور با شیبی تند (شکل 5-c) و کمترین تأثیر آن بر دمای اگزوز با شیبی ملایم (شکل 5-b) بوده است. سرعت لحظه‌ای موتور مستقیماً متأثر از سرعت اولیه می‌باشد و احتمالاً به همین دلیل بیشترین تأثیر سرعت اولیه موتور بر این پارامتر بود. در واقع، هنگامی که موتور در یک سرعت اولیه و گشتاور مشخص باشد با افزایش سرعت اولیه به یک مقدار بالاتر و با همان گشتاور قبلی، افت سرعت

موتور در دو حالت تقریباً یکسان است و سرعت لحظه‌ای موتور تقریباً به نسبت یک به یک با سرعت اولیه افزایش می‌یابد. تأثیر سرعت موتور بر دمای اگزوز، مثبت (افزایشی) بود. نتیجه‌ی مشابه در تحقیق دیگر محققین نیز گزارش شده است [16,13].

روند تغییرات پارامترهای حداکثر و میانگین کدری دود اگزوز در برابر گشتاور در سرعت‌های مختلف کاملاً مشابه بوده به طوری که در یک سرعت اولیه ثابت، با افزایش گشتاور ابتدا با شیبی ملایم و سپس با شیبی تند افزایش یافته‌اند. با کاهش سرعت موتور و افزایش گشتاور، مقادیر پارامترهای کدری دود افزایش چشم‌گیری داشتند. تغییرات کدری دود اگزوز در بارهای پایین چندان متأثر از سرعت موتور نبوده و با افزایش سرعت، مقدار کدری افزایش ناچیزی را نشان داده است (شکل‌های 5-d و 5-e). نتیجه‌ی به دست آمده در تحقیق دیگر محققین حاکی از آن بود که بار موتور و سرعت موتور به ترتیب بیشترین و کمترین تأثیر مثبت را بر میزان کدری دود اگزوز داشتند [5].

3-4- ارزیابی مدل‌ها

مقایسه‌ی بین مقادیر واقعی و مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل رگرسیون خطی مربوط به هر پارامتر برای داده‌های آموزش و تست به طور جداگانه در شکل 6 نشان داده شده است.

خط‌چین نشان داده شده در هر شکل، نیم‌ساز ربع اول است تا پراکندگی نقاط در اطراف این خط، نمایان شود. هم‌چنین معادله‌ی مربوطه به همراه ضریب تبیین آن در هر شکل نمایش داده شده است. همان‌گونه که از پراکندگی نقاط مشخص است مدل‌های رگرسیون خطی مربوط به پارامترهای دبی جرمی سوخت، دمای اگزوز و سرعت لحظه‌ای موتور پیش‌بینی بهتری نسبت به مدل‌های دو پارامتر دیگر داشته‌اند و تطابق مقادیر پیش‌بینی شده و مقادیر واقعی در این سه پارامتر، به ویژه در مورد دمای اگزوز و سرعت لحظه‌ای موتور به وضوح مشهود است. در معادلات سیر روند پارامترها در شکل 6 هرچه شیب خط به یک نزدیک‌تر باشد حاکی از تطابق بیشتر مقادیر پیش‌بینی شده با مقادیر واقعی پارامتر است. نجفی [30] نیز در تحقیقی به منظور ارزیابی مدل‌های تخمین عملکرد و آلایندگی موتور دیزل، نمودارهای مقادیر پیش‌بینی شده‌ی پارامترها در برابر مقادیر هدف (واقعی) را ارائه داده است. شیب خط برازش شده و ضریب تبیین آن به ترتیب برای مصرف سوخت ویژه ترمزی برابر 0.990 و 0.998 و برای انتشار هیدروکربن‌های نسوخته برابر 0.960 و 0.988 به دست آمده که حاکی از کارآیی مناسب مدل‌های به دست آمده بود. ثابت سروستانی و همکاران [25] نیز تطابق بالایی بین مقادیر پیش‌بینی مدل‌های مصرف سوخت و کدری دود اگزوز با مقادیر واقعی به ترتیب با ضرائب تبیین 0.98 و 0.96 به دست آوردند.

4- نتیجه‌گیری

دبی جرمی مصرف سوخت، دمای اگزوز و سرعت لحظه‌ای موتور دیزل به خوبی توسط گشتاور و سرعت اولیه‌ی موتور تبیین و مدل‌سازی خطی شده‌اند و مقادیر خروجی این مدل‌ها دارای تطابق بسیار بالایی با مقادیر واقعی بوده‌اند؛ اما این تطابق در مورد حداکثر و میانگین کدری دود اگزوز ضعیف‌تر بوده است. بیشترین و کمترین تأثیر گشتاور موتور به ترتیب بر دمای اگزوز و سرعت لحظه‌ای موتور بوده در حالی که این نتیجه برای سرعت اولیه‌ی موتور کاملاً برعکس بوده است. روند تغییرات پارامترهای کدری دود اگزوز در برابر گشتاور در سرعت‌های مختلف کاملاً مشابه بوده به طوری که در یک سرعت اولیه ثابت، با افزایش گشتاور ابتدا با شیبی ملایم و سپس با شیبی تند افزایش یافته‌اند.

حداکثر و میانگین کدری دود اگزوز دارای همبستگی خطی مناسبی بوده‌اند. همچنین، دبی جرمی مصرف سوخت رابطه‌ی خطی قوی با دمای اگزوز داشته و مدل خطی به دست آمده می‌تواند در تحقیقات آتی دیگر محققین بسیار راه‌گشا و موثر باشد چرا که اندازه‌گیری دمای اگزوز بسیار ساده است و مستلزم استفاده از ابزارهای پیچیده و گران‌قیمت نیست.

به عنوان یک نتیجه‌ی کلی می‌توان گفت رگرسیون خطی چندمتغیره ابزاری قوی و مناسب برای تحلیل پارامترهای عملکردی موتور بوده و مدل‌های خطی سودمند و کارآمدی را ارائه می‌دهد. این مدل‌ها اگر در دامنه‌ی وسیع‌تری طراحی و ارزیابی شوند می‌توانند موجب صرفه‌جویی در زمان و هزینه‌ی انجام بسیاری از آزمایش‌های تجربی (در دسترس نبودن و یا قیمت بالای ابزار اندازه‌گیری دقیق برخی پارامترها) شوند.

5- فهرست علائم

EF	بازده‌ی مدل
ET	دمای اگزوز (°C)
FMF	دبی جرمی مصرف سوخت (gs^{-1})
$IRPM$	سرعت لحظه‌ای موتور (rpm)
$MEEO$	میانگین کدری دود اگزوز (m^{-1})
MEO	حداکثر کدری دود اگزوز (m^{-1})
N_p	سرعت اولیه موتور (rpm)
RMSE	جذر میانگین مربعات خطا
SS_E	مجموع مربعات خطا
SS_R	مجموع مربعات رگرسیون
SS_T	مجموع مربعات کل
T	گشتاور (Nm)
x	متغیر مستقل
y	متغیر وابسته

6- مراجع

[1] N. Mrad, E. G. Varuvel, M. Tazerout, F. Aloui, Effects of biofuel from fish oil industrial residue-Diesel blends in diesel engine, *Energy*, Vol. 44, No. 1, pp. 955-963, 2012.
[2] A. Zenouzi, B. Ghobadian, T. Tvakoli Hashjin, M. Feyzolahnejad, H. Bagherpour, Effect of waste oil methyl ester on tractor engine performance, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 10, No. 2, pp. 1-9, 2010. (in Persian فارسی)
[3] M. R. Seifi, S. R. Hassan-Beygi, B. Ghobadian, U. Desideri, M. Antonelli, Experimental investigation of a diesel engine power, torque and noise emission using water–diesel emulsions, *Fuel*, Vol. 166, No. 1, pp. 392-399, 2016.
[4] E. Y. Kim, A. C. C. Tan, B. S. Yang, Acoustic emission for diesel engine monitoring: a review and preliminary analysis, *Engineering Asset Management and Infrastructure Sustainability*, Vol. 1, No. 1, pp. 489-499, 2012.
[5] A. Abbaszadeh, B. Ghobadian, Investigation of effects of working parameters of a diesel engine on exhaust opacity, *The 5th National Congress of Agricultural Machinery Engineering and Mechanization*, Mashhad, Iran, August 27-28, 2008. (in Persian فارسی)
[6] M. Fallah, M. Mohammadpourfard, Experimental investigation of effects of engine cooling temperature, EGR and injection timing to reduce NOx emissions in the diesel engines, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 11, No. 4, pp. 1-9, 2011. (in Persian فارسی)
[7] P. Soltani Nazarloo, H. Haji Agha Alizadeh, H. Rabbani, B.

[18] M. Bilgili, B. Sahin, Comparative analysis of regression and artificial neural network models for wind speed prediction, *Meteorology and Atmospheric Physics*, Vol. 109, No.1, pp. 61-72, 2010.

[19] D. C. Montgomery, E. A. Peck, G. G. Vining, *Introduction to Linear Regression Analysis*, 5th Edition, pp. 15-321, New Jersey: Wiley, 2012.

[20] E. Uludamar, E. Tosun, K. Aydin, Experimental and regression analysis of noise and vibration of a compression ignition engine fuelled with various biodiesels, *Fuel*, Vol. 177, No. 1, pp. 326-333, 2016.

[21] M. Momeni, A. F. Ghayoumi, *Statistical Analysis with SPSS*, 3rd Edition, pp. 26-135, Tehran: Ganj Shaygan, 2015. (in Persian فارسی)

[22] M. R. Ebrahimzadeh, A. M. Borghei, A. H. Tabatabaeifar, A. R. Masoodi, Appropriate model for identification of mechanical faults of MF399 tractor engine by oil analysis according to working condition, *Journal of Agricultural Sciences*, Vol. 11, No. 1, pp. 23-40, 2005. (in Persian فارسی)

[23] M. Fallah, M. Mohammadpourfard, Numerical and analytical optimization of EGR cooling circuit in diesel engines, *Iranian Journal of Mechanical Engineering*, Vol. 12, No. 2(21), pp. 56-81, 2011. (in Persian فارسی)

[24] G. Naghavi Morad Khanlo, M. H. Khoshtaghaza, S. Minaie, Effect of Ballast and Speed on Slippage and Fuel Consumption of ITM285 Tractor, *Journal Of Agricultural Sciences*, Vol. 12, No. 3, pp. 693-702, 2006. (in Persian فارسی)

[25] N. Sabet Sarvestani, A. Rohani, A. Farzad, M. H. Aghkhani, Modeling of specific fuel consumption and emission parameters of compression ignition engine using nanofluid combustion experimental data, *Fuel Processing Technology*, Vol. 154, No. 1, pp. 37-43, 2016.

[26] ASME (American Society of Mechanical Engineers), Reciprocating Internal-Combustion Engines, *Performance Test Codes (PTC) 17*, 2012.

[27] ISIRI (Institute of Standards and Industrial Research of Iran), Test methods of agricultural tractors (part 2), *Standard Code 2568*, First edition, 1986. (in Persian فارسی)

[28] OECD (Organisation for Economic Co-operation and Development), OECD Standard Code for the Official Testing of Agricultural and Forestry Tractor Performance, *Code 2*, 2012.

[29] C. Borgnakke, R. E. Sonntag, *Fundamentals of Thermodynamics*, 8th Edition, 8th Edition, pp. 753-877, New Jersey: Wiley, 2013.

[30] B. Najafi, Artificial neural networks used for the prediction of the diesel engine performance and pollution of waste cooking oil biodiesel, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 11, No. 4, pp. 11-20, 2011. (in Persian فارسی)

Shadidi, Effect of exhaust gas recirculation (EGR) on engine performance and exhaust emissions on diesel engines, *The 8th National Congress of Agricultural Machinery Engineering (Biosystem) and Mechanization*, Mashhad, Iran, January 29-31, 2014. (in Persian فارسی)

[8] J. Arregle, V. Bermudez, J. R. Serrano, E. Fuentes, Procedure for engine transient cycle emissions testing in real time, *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 30, No. 5, pp. 458-496, 2006.

[9] *Smoke factor measurements with remote sensing device technology: recommended practice*, Publication series of Enviromental Systems Products (ESP), Accessed on 30 Mar 2017; http://opusinspection.com/wp-content/uploads/2016/02/20101110_ESP-RSD-Smoke-Factor-Final-Document.pdf

[10] A. K. Agrawal, S. K. Singh, S. Sinha, M. K. Shukla, Effect of EGR on the exhaust gas temperature and exhaust Opacity in compression ignition engines, *Sadhana*, Vol. 29, No. 3, pp. 275-284, 2004.

[11] Kh. PashaiHulasu, B. Mohammadi-Alasti, M. A. Haddad Derafshi, M. Abbasgholipour, Effect of turbo charger system on engine fuel consumption and tractor power and traction (ITM475, ITM485 and ITM800), *Journal of Agricultural Machinery*, Vol. 5, No. 2, pp. 313-324, 2015. (in Persian فارسی)

[12] B. Najafi, V. Pirouzpanah, B. Ghobadian, A. Sadegh Pourranjbar, Experimental investigation of performance and emission parameters of diesel engine using biodiesel alternative fuel, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 7, No. 28, pp. 79-91, 2007. (in Persian فارسی)

[13] S. H. Al-lwayzy, T. Yusaf, Diesel engine performance and exhaust gas emissions using Microalgae Chlorella protothecoides biodiesel, *Renewable Energy*, Vol. 101, No. 1, pp. 690-701, 2017.

[14] Y. Icingur, D. Altiparmak, Effect of fuel cetane number and injection pressure on a DI Diesel engine performance and emissions, *Energy Conversion and Management*, Vol. 44, No. 3, pp. 389–397, 2003.

[15] I. Celikten, An experimental investigation of the effect of the injection pressure on engine performance and exhaust emission in indirect injection diesel engines, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 23, No. 16, pp. 2051-2060, 2003.

[16] S. Rostami, B. Ghobadian, L. Savadkouhi, R. Ebrahimi, Experimental investigation of effect of injection pressure on performance of a diesel engine using blends of biodiesel and diesel, *Engine Research*, Vol. 21, No. 21, pp. 73-82, 2011. (in Persianفارسی)

[17] V. Kotu, B. Deshpande, *Predictive Analytics and Data Mining: Concepts and Practice with Rapidminer*, pp. 165-193, San Francisco: Morgan Kaufmann, 2015.