بررسی تأثیر میزان کارکرد فیلتر سوخت موتور بنزینی بر فشار سوخت و آوانس جرقه با استفاده از روش سطح پاسخ

مانی قنبری[۱]
دپارتمان مهندسی مکانیک ماشین‌های کشاورزی
دانشگاه فنی و حرفه‌ای استان تهران

لطفعلی مظفری وانانی[۲]
دپارتمان مهندسی مکانیک
دانشگاه فنی و حرفه‌ای استان چهارمحال و بختیاری

غلامحسن نجفی[۳]
دپارتمان مهندسی مکانیک بیوسیستم
دانشگاه تربیت مدرس

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۱/۲۳؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۷/۰۷)

چکیده

در موتورهای احتراق داخلی، سامانه سوخت‌رسانی یکی از دقیق‌ترین و حساس‌ترین بخش‌های موتور است. در این تحقیق، با هدف بهبود پارامترهای احتراق و افزایش کارایی موتور، تأثیر میزان کارکرد فیلتر سوخت بر مشخصه‌های موتور به‌صورت تجربی بررسی شد. پارامترهای اصلی مورد بررسی در این تحقیق، فشار سوخت در مدار سوخت‌رسانی و آوانس جرقه بودند. سپس به کمک روش سطح پاسخ (RSM) تحلیل اثر متقابل متغیرها بر میزان آوانس جرقه موتور بررسی شد و یک سامانه هوشمند کنترل برای تعیین زمان مناسب تعویض فیلتر سوخت در یک موتور و اطلاع به کاربر طراحی گردید. بیشترین مقدار فشار ورودی فیلتر بنزین در مدار سوخت‌رسانی در فیلتر دارای کارکرد ۵۰.۰۰۰km به میزان ۴/۵ bar اندازه‌گیری شد. همچنین کمترین مقدار فشار ورودی، در صورت استفاده از فیلتر نو، ۳/۵ bar اندازه‌گیری شد. نتایج این تحقیق نشان داد که میزان کارکرد فیلتر سوخت بر پارامترهای اصلی موتور مانند نسبت وزنی اختلاط سوخت و هوا و آوانس جرقه نیز تأثیر قابل توجهی دارد. بررسی‌ها در موتورهای Euro2 و Euro4 نشان داد که آوانس جرقه در دور موتور ۱.۰۰۰ rpm با فیلتر سوخت نو دارای مقدار ۷ درجه است (کم‌ترین مقدار)، در حالی که بیشینه آوانس جرقه در دور موتور ۵.۰۰۰ rpm و با فیلتر دارای کارکرد ۵۰.۰۰۰ km به میزان ۳۷ درجه اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد که گرفتگی فیلتر بنزین تأثیر قابل توجهی بر فشار سوخت، نسبت اختلاط سوخت به هوا و آوانس جرقه دارد که این عوامل تأثیر مستقیم در کیفیت احتراق و راندمان موتور خواهند داشت.

واژه‌های کلیدی: موتور بنزینی، سامانه سوخت‌رسانی، فیلتر سوخت، فشار سوخت، آوانس جرقه

Investigating the Effect of Gasoline Fuel Filter Lifetime on Fuel Pressure and Ignition Advance Using the RSM Method

M. Ghanbari
Mechanical Engineering of Agricultural Machinery Department of Technical and Vocational University (TVU), Tehran branch

L. Mozafari Vanani
Mechanical Engineering Department of Technical and Vocational University (TVU), Chaharmahal and Bakhtiari branch

G. Najafi
Mechanics of Biosystem Engineering Department of Tarbiat Modares University, Tehran

(Received: 11/April/2020 ; Accepted:28/September/2020)

ABSTRACT

In internal combustion engines, the fuel system is one of the most accurate and sensitive parts of the engine. In this study, the effect of fuel filter lifetime on engine characteristics was examined experimentally. The main parameters examined in this study were fuel pressure and ignition advance. Then, using the response surface method (RSM), the interaction effect of the variables on the engine ignition advance was examined and a smart control system was designed to determine the appropriate time to change the fuel filter in an engine and inform the user. The maximum inlet pressure of the gasoline filter with a filter lifetime of 50,000 km was measured as 4.5 bar. Also, the lowest amount of inlet pressure, if using a new filter, was measured as 3.5 bar. The results of this study showed that the fuel filter lifetime also has a significant effect on the main parameters of the engine, such as the weight ratio of the fuel-to-air mixture and the ignition advance. Studies in Euro2 and Euro4 engines have shown that the ignition advance at 1,000 rpm engine speed with a new fuel filter was seven degrees (minimum value), while the maximum ignition advance at 5,000 rpm engine speed and with a 50,000 km filter lifetime was measured at 37 degrees. The results showed that gasoline filter clogging has a significant effect on fuel pressure, fuel-to-air mixing ratio, and ignition advance, which in turn will have a direct impact on combustion quality and engine efficiency.

Keywords: Gasoline engine, Fuel system, Fuel filter, Fuel pressure, Ignition Advance

۱- مربی: manighanbari@tvu.ac.ir
۲- مربی (نویسنده پاسخگو): L-mozafari@tvu.ac.ir
۳- دانشیار: g.najafi@modares.ac.ir

۱- مقدمه

یکی از مهم‌ترین بخش‌های موتورهای چهارزمانه بنزینی، سامانه سوخت‌رسانی آن است. اجزای اصلی سامانه سوخت‌رسانی شامل باک، پمپ بنزین، لوله‌های انتقال‌دهنده سوخت، فیلتر بنزین، ریل سوخت و انژکتورها هستند. تعویض به‌موقع فیلتر سوخت، یکی از مهم‌ترین نکات سرویس و نگهداری سامانه سوخت‌رسانی یک موتور بنزینی است. این سرویس تأثیر زیادی در عملکرد صحیح و افزایش طول عمر اجزای سامانه سوخت‌رسانی دارد. عملکرد مناسب سامانه سوخت‌رسانی بر بهبود کیفیت احتراق، افزایش راندمان موتور، کاهش پدیده کوبش و آلاینده‌های زیست‌محیطی تأثیر دارد.

دقت در تصفیه سوخت در خودروهای انژکتوری امروزی بسیار مهم‌تر از سامانه سوخت‌رسانی کاربراتوری قدیمی است. زیرا در یک خودرو انژکتوری، هر انژکتور دارای یک یا چند سوراخ بسیار ریز است که بسته به تعداد آن‌ها، قطری کمتر از ۰٫۲ mm دارند و با توجه به اینکه هر انژکتور برای مدت زمانی کمتر از ۰٫۰۰۵ s جهت پاشش سوخت باز می‌شود، وجود ذرات خارجی در سوخت می‌تواند به‌راحتی منجر به گرفتگی مجاری انژکتور و اختلال در سامانه گردد [۱]. سامانه سوخت‌رسانی یک موتور احتراقی، از مهم‌ترین و دقیق‌ترین سامانه‌های آن به شمار می‌رود و بنابراین مطالعه در مورد این سامانه از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است [۲]. در دنیای ماشینی حاضر، نیاز به سوخت‌های فسیلی افزایش بسیار زیادی پیدا کرده و در نتیجه با استخراج نفت خام، منابع زیر زمینی کاهش یافته و از طرفی میزان آلاینده‌های هوا نیز افزایش داشته است [۳]. از این‌رو بهینه‌سازی سامانه‌های تصفیه سوخت اهمیت ویژه‌ای دارد. یکی از عوامل اصلی کثیف شدن سوخت، رسوبات موجود در تانکرهای حمل سوخت و یا ذرات معلق و رسوبات ته‌نشین شده در مخازن جایگاه‌های توزیع سوخت است. همچنین وجود ذرات ناخالصی در لوله‌های ارتباطی سامانه سوخت-رسانی، ناخالصی‌های ناشی از خوردگی مجاری سوخت‌گیری خودرو و ذرات گرد و غبار هوا که در سوخت وارد می‌شوند نیز عوامل دیگر کثیفی سوخت هستند. همه موارد ذکرشده باید توسط فیلتر سوخت تصفیه شده و از ورود آنها به قطعات حساس سامانه سوخت‌رسانی جلوگیری شود. بعضی از شرکت‌های خودروساز، زمان مناسب برای تعویض صافی بنزین را هر ۱۵۰۰۰km توصیه کرده‌اند، اما کارکرد کیلومتر خودرو به تنهایی ملاک مناسبی برای تعیین زمان تعویض فیلتر سوخت نیست. زیرا میزان گرفتگی فیلتر سوخت به عوامل مختلفی مانند شرایط جاده و تردد خودرو، محل کارکرد خودرو، کیفیت بنزین جایگاه‌ها، ذرات ناخالصی موجود در سامانه سوخت‌رسانی و رسوبات موجود در باک وابسته است. با گذشت زمان و افزایش کارکرد خودرو، فیلتر بنزین به‌دلیل به دام انداختن ذرات ناخالصی سوخت، دچار گرفتگی و انسداد می‌شود. کثیفی و گرفتگی فیلتر بنزین باعث پایین آمدن بازده موتور، افزایش زمان استارت‌زنی به‌خصوص در هوای سرد، کثیف شدن و گرفتگی انژکتورها، خاموشی خودرو و کوتاه شدن عمر تجهیزاتی مانند پمپ بنزین، انژکتور و حس‌گر اکسیژن و در بعضی موارد سوختن سوپاپ‌های موتور می‌شود [۴]. با توجه به اهمیت فیلتراسیون سوخت، اجتهادی [۵] عوامل مهم در فیلتراسیون سوخت موتورهای دیزل پیشرفته را مورد بررسی قرار داد. طبق نتایج به‌دست‌آمده در تحقیق ایشان، به‌کارگیری اصول مناسب در تهیه و نگهداری و توزیع سوخت، کارکرد دستگاه‌های مزبور را تا حد قابل توجهی ارتقاء بخشیده و باعث کاهش چشم‌گیر هزینه تعمیرات خواهد شد. جعفریان جلودار و همکاران [۶] در پژوهش خود با استفاده از روش سطح پاسخ RSM، اقدام به بهینه‌سازی پارامترهای مؤثر بر فرایند تولید فیلترهای بنزین به روش تزریق پلاستیک کردند. نتایج ایشان در جهت بهینه‌سازی تولید فیلترهای بنزین مفید بوده است. غفاری و همکاران [۷] علل آلایندگی هوا توسط اتوبوس‌های با موتور دیزل را مورد بررسی قرار دادند. نتایج تحقیق ایشان نشان داد که عواملی همچون وجود ذرات ناخالصی در سوخت گازوئیل، درصد گوگرد بالا و همچنین فرسودگی سامانه سوخت‌رسانی مهم‌ترین دلایل افزایش آلایندگی موتورهای دیزلی هستند. در پژوهش انجام‌شده توسط گِیلیس و پیرس [۸]، تأثیر بازه زمانی تعویض فیلترهای هوا بر قدرت و مصرف سوخت موتور خودرو مورد بررسی قرار گرفت. ایشان نتیجه گرفتند که مهم‌ترین معیار برای تعویض فیلتر هوا در یک خودرو، میزان مقاومت فیلتر (اختلاف فشار قبل و بعد از فیلتر) است و در صورت گرفتگی و کثیفی فیلتر هوا، عوارضی همچون کاهش توان خروجی از موتور و افزایش مصرف سوخت و آلایندگی

رُخ خواهد داد. صبری عالم و اشرف سعید [۹] در پژوهشی به روش تجربی و مدل‌سازی CFD تأثیر فیلترهای هوای چین‌دار را بر مصرف سوخت موتورهای دیزل بررسی کردند. ایشان در تحقیق خود به دنبال بهینه‌سازی پارامترهای فیلترهای هوا به‌منظور بهبود عملکرد موتورهای دیزل بودند. یافته‌های تحقیق ایشان حاکی از آن بود که اگر شکل چین‌های فیلتر به‌صورت سینوسی باشد، افت فشار کمتری هنگام عبور هوا به وجود خواهد آمد. همچنین فیلتر هوای کهنه منجر به افت فشار بیشتر در مسیر عبور هوا و افزایش مصرف سوخت خواهد شد. جان توماس و همکاران [۱۰] تأثیر شرایط فیلتر هوا را بر میزان مصرف سوخت موتورهای دیزل دارای توربوشارژ، مورد بررسی قرار دادند. هدف اصلی تحقیق ایشان بررسی این موضوع بود که آیا تعویض به‌موقع فیلتر هوا باعث کاهش مصرف سوخت خواهد شد یا خیر؟ در پاسخ به این سوال، نتایج تحقیق مذکور نشان داد که در موتورهای دیزل دارای توربوشارژ به‌دلیل فشار توربو، حساسیت نسبت به وضعیت فیلترهای هوا نسبتاً پایین است. در تحقیقی شارما و کومار [۱۱] به بررسی تأثیر فشار سوخت و دور موتور بر پارامترهایی همچون احتراق، عملکرد و آلایندگی موتور بنزینی با استفاده از ترکیب سوخت‌های مختلف پرداختند. ایشان به این نتیجه رسیدند که فشار سوخت می‌تواند در کنار متغیرهای دیگر موتور به‌عنوان متغیر تأثیرگذار در عملکرد موتور نقش داشته باشد. در پژوهشی کامیاب و همکاران[۱۲] با تمرکز بر شبیه‌سازی رفتار سیال در فیلتر سوخت و مدار سوخت‌رسانی یک بالگرد، به این نتیجه رسیدند که فیلتر مورد استفاده با توجه به میزان تمیزی، افت فشاری در بازه ۰bar تا ۱bar ایجاد خواهد کرد که این امر سبب ایجاد اخلال و وقفه در انجام مأموریت‌های نظامی بالگرد می‌شود. در زمینه تأثیر فیلترهای سوخت بر عملکرد موتورهای بنزینی، رحمتی نژاد و اکبرلو [۱۳] طی یک بررسی تجربی، اقدام به مانیتورینگ فشار سوخت ارسالی از پمپ بنزین در محل قبل از فیلتر سوخت کردند. سپس با مقایسه مقادیر فشار به‌دست‌آمده در حالت‌های مختلف، نتیجه گرفتند در صورتی که فشار سوخت در مجرای ورودی فیلتر به میزان ۴bar تا ۴٫۵bar باشد، فیلتر سوخت سالم است. ولی در صورت گرفتگی و کثیف بودن فیلتر، فشار سوخت در مجرای ورودی فیلتر بالا رفته و تا حدود ۶٫۵bar تا ۷bar افزایش خواهد یافت. در تحقیق ایشان، شرایط آزمون در حالت موتور خاموش و پارامتر اندازه‌گیری شده فقط فشار سوخت در مرحله قبل از فیلتر بوده است. توماس دوربین و همکاران [۱۴] به‌صورت تجربی به بررسی تأثیر فیلترهای سوخت دیزل و همچنین نوع سوخت دیزل بر میزان تولید گازهای گلخانه‌ای در خودروهای دیزلی با وزن متوسط پرداختند. نتایج تحقیق ایشان نشان داد فیلترهای سوخت دیزل[1] (DPFs) قادر هستند که مقادیر ذرات معلق PM، هیدروکربن‌های نسوخته THC و مونوکسید کربن CO را به ترتیب تا حدود ۹۸٪، ۸۰٪ و ۹۰٪ کاهش دهند. نصرآبادی و کاکایی [۱۵] در پژوهش خود اقدام به بررسی تأثیر پارامترهای عملکردی یک موتور بنزین‌سوز EF7 بر آوانس جرقه آستانه کوبش[2](KLSA) کردند. در تحقیق ایشان، پارامترهای موتور برای عملکرد در شرایطی که موتور در آستانه کوبش قرار گیرد ولی دچار کوبش نشود، بهینه‌سازی شدند. نتایج تحقیق ایشان نشان داد درصورتی که نسبت اختلاط هوا به سوخت از حالت استوکیومتری انحراف پیدا کند (رقیق یا غلیظ شود)، در این‌صورت آوانس جرقه نیز به ترتیب افزایش و کاهش پیدا خواهد کرد. قنبری و همکاران [۱۶] به بررسی تأثیر فیلتر سوخت موتور بنزینی بر آوانس جرقه پرداختند و به این نتیجه رسیدند که افزایش کارکرد فیلتر بنزین موجب افزایش آوانس جرقه خواهد شد. در تحقیقات زیادی از روش تحلیل آماری سطح پاسخ (RSM) جهت بررسی پارامترهای عملکردی موتورهای احتراق داخلی استفاده شده است. الماسی و همکاران [۱۷] در یک مطالعه با استفاده از روش سطح پاسخ، فرآیند تولید بیودیزل از روغن کلزای غیرخوراکی را بررسی کردند، در تحقیق مذکور، روش سطح پاسخ توانست به‌خوبی و با دقت بالا به کمک یک معادله چندجمله‌ای درجه دوم بازده واکنش تولید بیودیزل حاصل از روغن کلزای غیرخوراکی را برآورد کند. جلیلیان تبار و همکاران [۱۸] به‌منظور بهینه‌سازی نسبت EGR، شرایط کاری یک موتور بیودیزل و مقدار آلاینده‌های خروجی از اگزوز را با استفاده از روش RSM مورد مطالعه قرار دادند. دول و همکاران [۱۹] یک مدل ریاضی برای بررسی همبستگی بین مقدار آلاینده‌ها و عوامل عملکردی موتور دیزل دوگانه‌سوز (همچون بار و دور موتور و میزان سوخت

1- Diesel Particular Filters
2- Knock Limited Spark Advance (KLSA)

جایگزین شده با هیدروژن) ارائه کردند. آنها از روش سطح پاسخ (RSM) برای بررسی میزان آلاینده‌ها و عملکرد موتور دیزل استفاده کردند. شعبانی و همکاران [۲۰] در تحقیق خود عملکرد موتور تراکتور را با استفاده از مخلوط سوخت بیودیزل و اتانول به روش سطح پاسخ (RSM) مورد بررسی قرار دادند. بر اساس نتایج تحقیق ایشان، سرعت دورانی موتور مؤثرترین عامل در افزایش توان موتور بود. علاوه بر آن ترکیب سوخت زیستی، دیزل و اتانول مصرف‌شده در موتور و سرعت موتور از مهم‌ترین شاخص‌های مؤثر بر مقدار مصرف سوخت ویژه بودند. ارول و همکاران [۲۱] با استفاده از روش سطح پاسخ عملکرد و آلایندگی خروجی از اگزوز یک موتور دیزل را با سوخت بیودیزل استخراج‌شده از گیاه کانولا پیش‌بینی کردند. در تحقیق دیگری متغیرهای مختلف موتور مانند بار و ترکیب سوخت در بهبود پارامترهای مختلف یک موتور دیزل با استفاده از روش سطح پاسخ پیش‌بینی گردید [۲۲].

با مرور پژوهش‌های پیشین می‌توان دریافت که در تحقیقات اندکی، به موضوع مهمی همچون بررسی اثر میزان کارکرد فیلترهای سوخت بر عوامل عملکردی سامانه سوخت‌رسانی و جرقه‌زنی موتور پرداخته شده است. بنابراین هدف اصلی از انجام این تحقیق بررسی چگونگی تأثیر میزان کارکرد (طول‌عمر) فیلتر سوخت بر پارامترهای خروجی موتور بنزینی بوده است. پارامترهای هدف در این تحقیق تغییرات فشار در سامانه سوخت‌رسانی و آوانس جرقه شمع در نظر گرفته شده‌اند. عوامل ذکرشده، نقش کلیدی در قدرت و میزان کوبش موتور دارند. در این تحقیق به کمک روش آماری سطح پاسخ، ارزیابی پارامتر اصلی مسأله و اثر مستقل و متقابل آنها بر متغیرهای خروجی انجام شده است. همچنین به‌منظور تعیین زمان مناسب برای تعویض فیلتر سوخت، یک سامانه هوشمند کنترل فشار سوخت و اعلام زمان تعویض فیلتر طراحی و معرفی شده است.

۲- مواد و روش‌ها

در این تحقیق دو موتور چهار سیلندر خطی متعلق به خودروهای پراید مدل صبا (Euro2) و پژو ۲۰۶ Tu5 (Euro4) جهت انجام آزمون‌های تجربی مورد استفاده قرار گرفته است. مشخصات فنی موتورهای مورد استفاده در این تحقیق در جدول **۱** آمده است. هر دو موتور تک سوخته (بنزین سوز) انتخاب شدند که کارکرد موتور به‌طور مستقیم در فیلتر بنزین آنها اثرگذار باشد. همچنین دو موتور در یک شرایط آب و هوایی قرار داشتند. شرایط سوخت‌گیری هر دو خودرو یکسان در نظر گرفته شد و حدود ۸۰ درصد سوخت‌گیری‌های هر دو خودرو از یک جایگاه و در یک زمان انجام گرفته است. علاوه بر آن شرایط کارکرد و پیمایش خودروها به‌طور تقریبی برابر و برای هر دو خودرو حدود ۷۰٪ از پیمایش برون‌شهری و حدود ۳۰٪ از پیمایش درون‌شهری با ترافیک روان در نظر گرفته شد. همچنین تعداد ۶ عدد فیلتر ساخت شرکت Perflex و با یک درجه از فیلتراسیون شامل یک عدد فیلتر نو و ۵ عدد فیلتر کارکرده که به ترتیب دارای کارکردهای ۱۰.۰۰۰ km، ۲۰.۰۰۰ km، ۳۰.۰۰۰ km، ۴۰.۰۰۰ km و ۵۰.۰۰۰ km بودند، متعلق به خودروهایی که تمام شرایط نگهداری و تعمیرات آنها تحت کنترل بوده است انتخاب شدند. دلیل این نوع انتخاب فیلتر امکان انجام مقایسه بین فیلترهای سوخت با کارکردهای مختلف بوده است. دلیل انتخاب دو موتور Euro2 و موتور Euro4 به دست آوردن اطلاعات و مقایسه بین دو نسل از موتورها جهت طراحی و ساخت سامانه هوشمند کنترل و تشخیص گرفتگی فیلتر است.

جدول (۱): مشخصات فنی موتور بنزینی چهار سیلندر Euro2 و Euro4

ردیف	عنوان مشخصه	مقدار مشخصه	
۱	مدل	پراید صبا	پژو ۲۰۶
۲	کارخانه سازنده	شرکت سایپا ایران	شرکت ایران خودرو ایران
۳	تعداد سیلندر	۴	۴
۴	گشتاور موتور	N.m ۱۰۳	N.m ۱۴۲
۵	حجم مفید موتور	۱۳۲۳ cc	۱۵۸۷ cc
۶	ترتیب احتراق	۱،۲،۴،۳	۱،۲،۴،۳
۷	نوع سامانه سوخت‌رسانی و نوع ECU	انژکتوری تک پاششی زیمنس	انژکتوری تک پاششی بوش
۸	حداکثر توان	۶۳hp	۱۱۰hp
۹	استاندارد آلایندگی	Euro2	Euro4

شرایط و میزان کارکرد یک فیلتر تأثیر مهمی بر میزان عبور سوخت از فیلتر خواهد داشت. لذا معیار مشخصه برای میزان کارکرد فیلتر در این تحقیق، کیلومتر کارکرد هر فیلتر بوده است. تصویر نمونه‌ای از فیلتر و فشارسنج مورد استفاده در این تحقیق در شکل **۱** قابل مشاهده است. جهت اندازه‌گیری فشار در مواضع مختلف مدار سوخت‌رسانی از فشارسنج NEK که قابلیت اندازه‌گیری فشار تا ۶ bar (۸۰psi) با دقت اندازه‌گیری ۰٫۲ bar را دارد، استفاده گردید. همچنین برای اندازه‌گیری پارامترهای مختلف سامانه موتور از یک دستگاه عیب‌یاب، دیاگ خودرو آزما (شکل **۲**) استفاده شد.

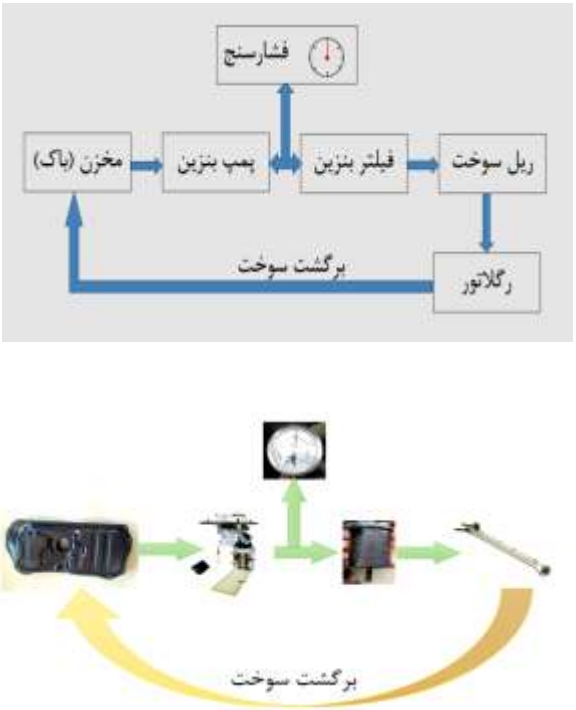
الف ب

شکل (۱): نمونه فیلتر بنزین (الف) و دستگاه فشارسنج (ب) مورد استفاده در آزمون‌های تجربی

شکل (۲): دستگاه عیب‌یاب موتور بنزینی انژکتوری (دیاگ)

در مرحله اول آزمایش‌ها ابتدا با فیلتر صفرکیلومتر (نو) و با استفاده از فشارسنج، فشار سامانه سوخت‌رسانی ابتدا قبل از فیلتر و سپس بعد از فیلتر اندازه‌گیری شد و فشارها با هم و با فشار فیلترهای دیگر مقایسه شد. با استفاده از دستگاه عیب‌یاب در زمان نصب هر فیلتر در ۵ دور موتور مختلف ۱.۰۰۰ rpm ، ۲.۰۰۰ rpm، ۳.۰۰۰ rpm، ۴.۰۰۰ rpm و ۵.۰۰۰ rpm پارامترهای اصلی موتور مانند فشار هوای ورودی مانیفولد، ولتاژ حس‌گر اکسیژن، آوانس جرقه، پاشش انژکتورها و زاویه دریچه گاز در دو موتور مورد آزمون مشاهده و ثبت شدند. سپس فیلترهای سوخت تعویض و آزمایش‌ها برای آنها نیز تکرار شد. یک طرح کلی از چگونگی انجام آزمایش‌های موتور در شکل **۳** و **۴** مشخص است.

دمای محیطی محل آزمون ۲۵ درجه سانتی‌گراد بوده و پس از نصب هر فیلتر، موتور در حالت درجا حدود یک دقیقه کارکرده سپس با دستگاه دیاگ دمای آب موتورها پایش شده و زمانی که دمای موتور به ۸۰ درجه سانتی‌گراد می‌رسید، اندازه‌گیری‌ها انجام می‌شدند. سپس دور موتور افزایش یافته تا به سرعت مورد نظر برسد، پس از پایدار شدن شرایط موتور، اطلاعات ثبت می‌گردید.



شکل (۳): اندازه‌گیری فشار سامانه سوخت‌رسانی قبل از فیلتر

شکل (۴): اندازه‌گیری فشار سامانه سوخت‌رسانی بعد از فیلتر

در این تحقیق، دو پارامتر فشار سوخت در سامانه سوخت‌رسانی و آوانس جرقه در سامانه جرقه‌زنی به ترتیب با استفاده از دستگاه فشارسنج و دستگاه عیب‌یاب موتور (دیاگ) مورد بررسی قرار گرفت. همچنین در خلال اندازه‌گیری پارامترهای هدف، سایر پارامترهای موتور از قبیل پاشش انژکتورها، فشار هوای مانیفولد ورودی و ولتاژ حسگر اکسیژن نیز مورد بررسی قرار گرفتند. اما مشاهده شد که تغییر وضعیت فیلتر سوخت تأثیر ناچیزی روی پارامترهای مذکور داشته و تغییرات محسوسی در آنها وجود نداشت، لذا از بررسی موارد فوق در این تحقیق صرف‌نظر شد.

۲-۱- طراحی آزمایش‌ها

طراحی آزمایش‌ها و تحلیل آماری در این تحقیق با استفاده از نرم‌افزار Design Expert-7 و روش سطح پاسخ[1] (RSM) از طرح مربع مرکزی[2] (CCD) انجام شد. روش طراحی آزمایش سطح پاسخ، شامل مجموعه‌ای از روش‌های ریاضی و آماری است که برای طراحی آزمایش‌ها، مدل‌سازی و بهینه-سازی فرآیندها مفید است [۲۳]. در اکثر مسائل مربوط به روش سطح پاسخ، رابطه بین پاسخ و متغیرهای مستقل مجهول است. بنابراین برای استفاده از روش سطح پاسخ، ابتدا باید تقریب مناسبی از ارتباط بین پاسخ‌ها و مجموعه متغیرهای مستقل در نظر گرفت. معمولاً از چندجمله‌ای‌های مرتبه پایین در محدوده‌ای از مقادیر متغیرهای مستقل استفاده می‌شود. اگر پاسخ توسط یک تابع خطی از متغیرهای مستقل به‌خوبی مدل شده باشد، آنگاه تابع تقریب کننده برای مدل مرتبه اول به‌صورت رابطه (۱) است [۲۴]:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \cdots + \beta_k x_k + \varepsilon \qquad (۱)$$

اگر در سامانه، انحنا وجود داشته باشد، آنگاه باید از چندجمله‌ای‌های مرتبه بالاتر، همچون مدل مرتبه دوم طبق رابطه (۲) استفاده کرد [۲۵]:

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^{k} \beta_i x_i + \sum_{i=1}^{k} \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{ij} \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (۲)$$

به‌منظور انجام تحلیل‌های آماری دو متغیر فیلتر سوخت و دور موتور به‌عنوان متغیرهای مستقل و آوانس جرقه به‌عنوان متغیر وابسته (پاسخ) در نظر گرفته شدند. برگ خرید کارکرد فیلتر سوخت در ۵ سطح با مقادیر ۱۰.۰۰۰ km، ۲۰.۰۰۰ km، ۳۰.۰۰۰ km، ۴۰.۰۰۰ km و ۵۰.۰۰۰ km و برگ خرید دور موتور نیز در ۵ سطح با مقادیر ۱.۰۰۰ rpm ، ۲.۰۰۰ rpm، ۳.۰۰۰ rpm، ۴.۰۰۰ rpm و ۵.۰۰۰ rpm مورد بررسی قرار گرفتند (جدول **۲**).

در جدول‌های **۳** و **۴** برای موتورهای Euro2 و Euro4 مدل خطی (Linear)، مدل خطی با در نظر گرفتن اثر متقابل (2FI)، مدل درجه دوم (Quadratic) و مدل درجه سوم (Cubic) مورد ارزیابی قرار گرفتند. با توجه به مقادیر ضریب تعیین، انحراف معیار و مجموع مربعات باقیمانده برآورد شده می‌توان دریافت که مدل درجه سوم (Cubic) قادر به تخمین مناسبی از داده‌ها نبوده و از میان مدل‌های دیگر، مدل درجه دوم (Quadratic) به‌عنوان بهترین مدل برای تحلیل آماری پیشنهاد گردید.

در جدول **۳** مشخصات مدل آماری درجه دوم مورد استفاده برای آوانس جرقه توسط نرم‌افزار Design Expert در موتور Euro2 ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در این تحلیل میزان انحراف معیار مدل Std.Dev=۰٫۴۹ و مجموع مربعات باقیمانده برآورد شده PRESS = ۱۶/۹۷ و R^2 =۰٫۹۹۸۳ که بیانگر دقت بالای برازش داده‌ها است.

در جدول **۴** مشخصات مدل آماری پیشنهادشده برای آوانس جرقه در موتور Euro4 قابل مشاهده است. با توجه به جدول **۴** مشخص است که مدل تابع درجه دوم یکی از نزدیک‌ترین مدل‌ها جهت تحلیل در این تحقیق می‌باشد که

1- Response Surface Method
2- Central composite design

میزان انحراف معیار مدل Std.Dev=۰/۳۴ و مجموع مربعات باقیمانده برآورد شده PRESS = ۶/۸۹ و R^2 =۰/۹۹۷۳ نشان می‌دهد که مدل استفاده شده برای پیش‌بینی پاسخ‌ها قابل اعتبار است.

جدول (۲): سطوح کدگذاری شده متغیرهای مستقل

Independent variables	Symbols	Levels of each factor				
Fuel Filter (Km)	A	0	12500	25000	37500	50000
Engine Speed (Rpm)	B	1000	2000	3000	4000	5000

جدول (۳): مدل‌های آماری (موتور بنزینی Euro2)

Source	Std.Dev.	R^2	Adjusted R^2	Predicted R^2	PRESS	
Linear	1.16	0.9866	0.9839	0.9657	34.50	
2FI	0.71	0.9955	0.9941	0.9865	13.51	
Quadratic	0.49	0.9983	0.9972	0.9831	16.97	Suggested
Cubic	2.79	0.9998	0.9988			Aliased

جدول (۴): مدل‌های آماری (موتور بنزینی Euro4)

Source	Std.Dev.	R^2	Adjusted R^2	Predicted R^2	PRESS	
Linear	1.98	0.8679	0.8415	0.7146	84.92	
2FI	1.98	0.8814	0.8418	0.4392	166.84	
Quadratic	0.34	0.9973	0.9954	0.9769	6.89	Suggested
Cubic	0.28	0.9987	0.9969	0.8485	45.08	Aliased

۳- نتایج و بحث

۳-۱- نتایج تجربی

۳-۱-۱- بررسی فشار سامانه سوخت‌رسانی

با بررسی نتایج حاصل از اندازه‌گیری فشار سوخت در قبل و بعد از فیلتر بنزین در کارکردهای مختلف دو موتور، مشاهده شد که به دنبال افزایش کارکرد فیلتر بنزین، اختلاف فشار ورودی و خروجی فیلتر بنزین نیز افزایش می‌یابد. دلیل این امر آن است که با افزایش کارکرد فیلتر بنزین و افزایش گرفتگی فیلتر مقاومت در برابر عبور سوخت زیاد شده و فشار در مقطع ورودی فیلتر افزایش و در خروجی آن کاهش خواهد داشت. نتایج مشاهده‌شده در این بخش از تحقیق در توافق کامل با نتایج تحقیق رحمتی نژاد و همکاران [۱۳] است.

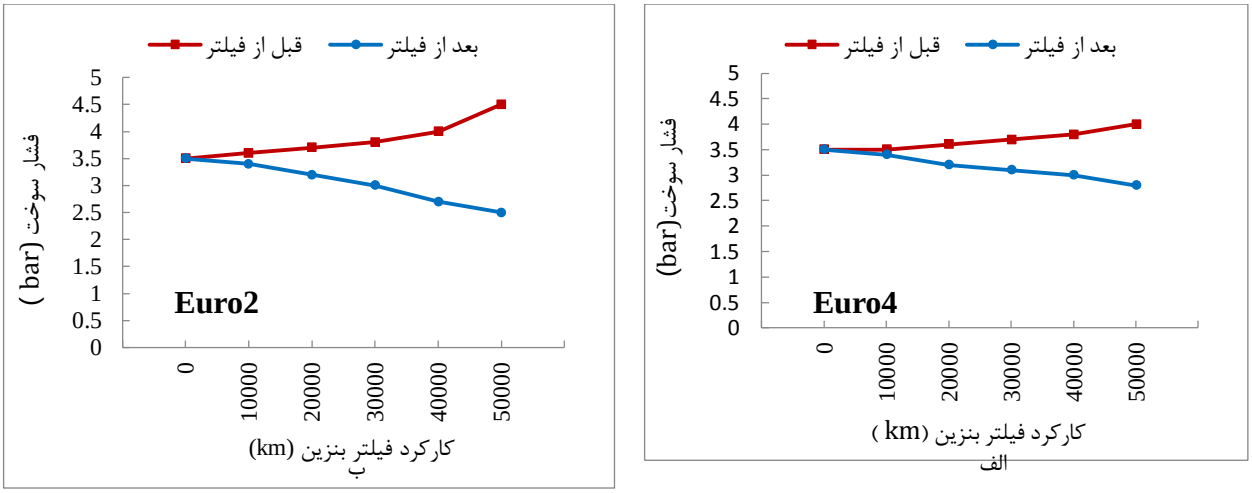
علاوه بر آن، در تحقیق حاضر در حالت روشن بودن موتور نیز تأثیر میزان مسافت کارکرد فیلتر بر اختلاف فشار سوخت در ناحیه قبل و بعد از فیلتر در دورهای مختلف موتور اندازه‌گیری شد. با توجه به این‌که پمپ بنزین یک پمپ الکتریکی است، بنابراین عملکرد آن مستقل از میزان دور موتور بوده و مشاهده گردید که فشار در دورهای مختلف موتور (۱.۰۰۰ rpm تا ۵.۰۰۰ rpm) اختلاف خیلی کمی دارد (کمتر از ۰/۲ bar) و تغییر فشار در ناحیه قبل و بعد از فیلتر، فقط تابع میزان کارکرد فیلتر است. تغییر فشار برحسب کارکرد فیلتر در نمودارهای شکل **۵** نشان داده شده است.

نتایج آزمون‌های تجربی نشان داد که در موتور Euro2 بیشترین فشار ورودی در فیلتر با کارکرد ۵۰.۰۰۰km ثبت شد که مقدار آن ۴/۵bar بود و کمترین فشار ورودی با فیلتر نو ۳/۵bar اندازه‌گیری شد. کمترین فشار خروجی نیز با فیلتر

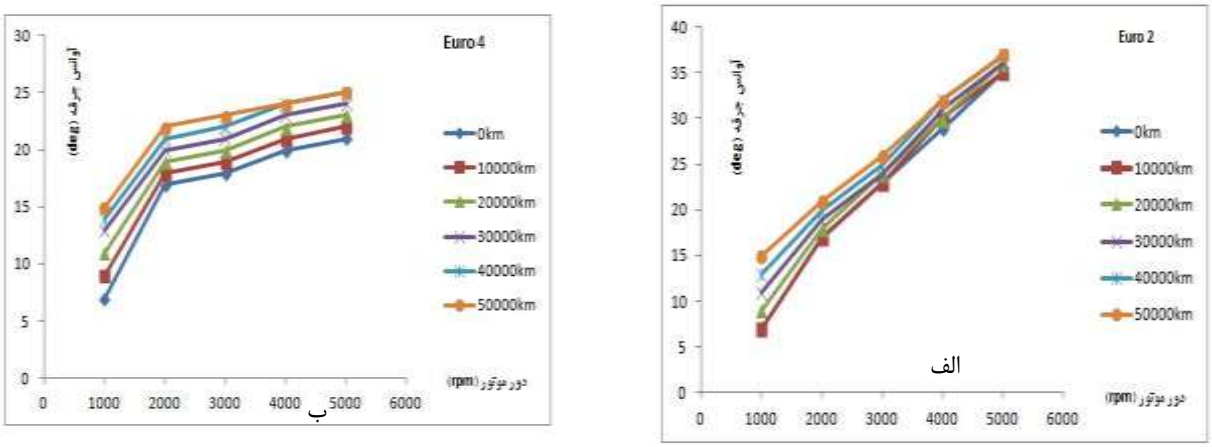
با کارکرد ۵۰.۰۰۰km به میزان ۲٫۵ bar و بیشترین فشار خروجی با فیلتر نو حدود ۳٫۵bar اندازه‌گیری شد. نتایج در مورد موتور Euro4 حاکی از آن بود که با افزایش کارکرد صافی بنزین میزان گرفتگی صافی افزایش یافته و بیشترین فشار ورودی در فیلتر با کارکرد ۵۰.۰۰۰km برابر با ۴ bar و کمترین فشار ورودی با فیلتر نو ۳٫۵ bar می‌باشد. کمترین فشار خروجی نیز با فیلتر با کارکرد ۵۰.۰۰۰km به میزان ۲٫۸bar و بیشترین فشار خروجی با فیلتر نو حدود ۳٫۵ bar اندازه‌گیری شد.

۳-۱-۲- بررسی آوانس جرقه

استفاده از فیلترهایی با کارکرد بالا منجر به افت فشار سامانه سوخت‌رسانی (بعد از فیلتر) خواهد شد. این امر باعث می‌شود ریل سوخت و ورودی انژکتورها نیز دچار افت فشار (تا حدود ۲٫۵ bar) شوند. این پدیده منجر به کاهش میزان اتمیزه شدن سوخت، تغییر در نسبت اختلاط وزنی سوخت به هوا و فقیر شدن مخلوط سوخت و هوا می‌گردد که این عوامل باعث احتراق ناقص در موتور خواهند شد. در نتیجه واحد کنترل الکترونیکی موتور (ECU) ، اقدام به تغییر آوانس جرقه جهت بهبود کیفیت احتراق خواهد کرد. با بررسی پارامترهای مختلف موتور به کمک دستگاه دیاگ، صحت این موضوع بررسی و مشخص گردید که در صورت افزایش کارکرد فیلتر بنزین، مقدار آوانس جرقه نیز افزایش قابل توجهی خواهد داشت. در نتایج مرجع [۱۵] ذکر شده بود که تغییر نسبت وزنی هوا به سوخت از حالت ایده‌آل (استوکیومتری) منجر به تغییر آوانس جرقه خواهد شد که نتایج تحقیق حاضر نیز در توافق با آن نتایج است. نمودار تغییرات آوانس جرقه نسبت به دور موتور با استفاده از فیلتر-های دارای کارکرد مختلف برای دو موتور Euro2 و Euro4 در شکل ۶ نشان داده شده است.



شکل (۵): تأثیر کارکرد فیلتر بر فشار سوخت مدار (الف- موتور چهار سیلندر Euro4) (ب- موتور چهار سیلندر Euro2)



شکل (۶): تأثیر کارکرد فیلتر بر آوانس جرقه (الف- موتور چهار سیلندر Euro2) (ب- موتور چهار سیلندر Euro4)

با توجه به مشاهدات انجام‌شده در موتور Euro2 کمترین میزان آوانس جرقه در دور موتور ۱.۰۰۰rpm با فیلتر نو به مقدار ۷ درجه (قبل از نقطه مرگ بالا) گزارش شد. در حالی که بیشترین میزان آوانس جرقه در دور موتور ۵.۰۰۰rpm به میزان ۳۷ درجه و با فیلتر با کارکرد ۵۰.۰۰۰km اندازه‌گیری شد. بررسی‌ها در موتور Euro4 حاکی از آن بود که کمترین میزان آوانس جرقه در دور موتور ۱.۰۰۰rpm به اندازه ۷ درجه با فیلتر نو مشاهده شد و بیشترین میزان آوانس جرقه در دور موتور ۵.۰۰۰rpm به میزان ۲۵ درجه و با فیلتر با کارکرد ۵۰.۰۰۰km اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد که با افزایش کارکرد فیلتر سوخت، فشار سوخت در ریل سوخت کاهش یافته و این امر موجب کاهش میزان اتمیزه شدن سوخت، تغییر در نسبت وزنی هوا به سوخت، فقیر شدن مخلوط و کاهش کیفیت احتراق می‌گردد. بنابراین ECU برای جبران احتراق ناقص و به‌منظور افزایش کیفیت احتراق میزان آوانس در جرقه شمع را افزایش می‌دهد [۱۵، ۱۶ و ۲۶]. دلیل اختلاف زیاد آوانس جرقه در دور ۱.۰۰۰rpm نسبت به سایر دورهای موتور با فیلترهای مختلف این مطلب است که در دورهای پایین‌تر به‌دلیل داشتن تعداد احتراق کمتر در واحد زمان، کیفیت احتراق در میزان عملکرد موتور تأثیر بیشتری خواهد گذاشت. بنابراین در فیلترهای دارای کارکرد بیشتر و در دورهای پایین، جهت خنثی کردن احتراق ناقص نیاز به آوانس جرقه بیشتری است. نتایج تجربی نشان داد که افزایش بیش از حد کارکرد فیلتر بنزین علاوه بر تأثیر منفی در سامانه سوخت‌رسانی، معایب دیگری نیز به دنبال خواهد داشت. همان‌طور که گفته شد، افت فشار سامانه سوخت‌رسانی در ناحیه بعد از فیلتر به‌دلیل افزایش کارکرد فیلتر بنزین، سبب کاهش نسبت وزنی ترکیب هوا و سوخت خواهد شد. به‌دلیل وجود حسگر اکسیژن، اطلاعات احتراق با سوخت رقیق به ECU گزارش شده و ECU با افزایش زمان پاشش سوخت در صدد جبران این مشکل برمی‌آید. اما به‌دلیل محدودیت زمان در سامانه زمان‌بندی موتور، ECU در افزایش زمان پاشش انژکتور محدودیت دارد. بنابراین در سرعت‌های مختلف موتور، ابتدا میزان پاشش انژکتورها افزایش یافته اما پس از لحظاتی به‌دلیل محدودیت، افزایش در میزان آوانس جرقه انجام می‌شود. این‌روال تغییرات در حین انجام آزمون‌های تجربی نیز مشاهده شد. افزایش بیش از حد آوانس جرقه خود دارای معایبی است. افزایش آوانس جرقه از یک سو میزان کوبش و ضربه در موتور را افزایش می‌دهد که خود باعث کوتاه شدن عمر قطعات موتور خواهد شد و از سوی دیگر منجر به افزایش دمای اگزوز شده که این امر نیز به غلظت زیاد آلاینده NOx در اگزوز ختم می‌گردد [۲، ۲۲، ۲۳ و ۲۸].

۳-۲- نتایج تحلیل‌های آماری

یکی از اهداف این تحقیق در استفاده از روش سطح پاسخ، رسیدن به روابطی است که ارتباط بین آوانس جرقه با میزان کارکرد فیلتر و دور موتور را نشان دهد. معادله رگرسیونی بین متغیرهای مستقل و متغیرهای وابسته در رابطه‌های ۳و۴ به ترتیب برای موتورهای Euro2 و Euro4 به دست آمد که می‌توان مقادیر مختلف متغیرها را نیز پیش‌بینی و تشخیص داد. در این روابط متغیر A میزان کارکرد فیلتر سوخت بر حسب کیلومتر (km) و متغیر B دور موتور برحسب دور بر دقیقه (rpm) هستند.

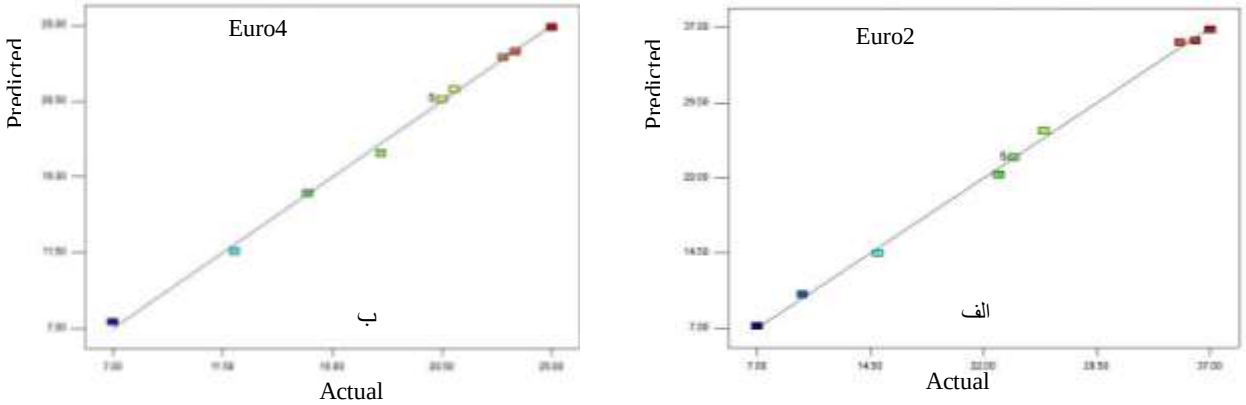
$$\text{Spark Advance} = +24.00 + 2.17 \times A + 12.67 \times B - 1.50 \times A \times B + 0.50 \times A^2 - 1.00 \times B^2 \quad (۳)$$

$$\text{Spark Advance} = +20.60 + 2.83 \times A + 5.92 \times B - 1.00 \times A \times B - 0.36 \times A^2 - 3.11 \times B^2 \quad (۴)$$

با بررسی نمودارهای شکل **۷** مشاهده می‌شود که نتایج به‌دست‌آمده به‌صورت تجربی با نتایج پیش‌بینی‌شده توسط نرم‌افزار تطابق دارد. همچنین در هر دو موتور ضریب تبیین معادل $R^2=0.99$ به دست آمد، که نزدیکی نتایج پیش‌بینی شده با داده‌های واقعی را نشان می‌دهد. یعنی ۹۹ درصد متغیرهای وابسته به متغیرهای مستقل بستگی دارد و تنها ۱ درصد از متغیرهای وابسته با استفاده از متغیرهای مستقل قابل توضیح دادن نیست که اعتبار مدل را ثابت می‌کند.

در جدول‌های **۵** و **۶** نتایج تحلیل واریانس برای ارزیابی متغیرهای مورد آزمایش ارائه شده است. مقدار p-value در جدول تحلیل واریانس اثر معناداری هر یک از متغیرهای مستقل بر متغیرهای وابسته را نشان می‌دهد. باید توجه داشت که مقادیر P-value<0.05 نشان‌دهنده معناداری اثر متغیرها در متغیر پاسخ هستند. اما مقادیر P-value>0.1 نشان می‌دهند که اثر متغیرها در متغیر پاسخ معنادار نیست. همچنین مقادیر کمتر برای P-value بیانگر معناداری بیشتر

می‌باشد. برای معنادار شدن آماری در سطوح اطمینان 95% تا 99% مقدارP-value باید به ترتیب کمتر از 0.05 تا 0.01 باشد. با توجه به نتایج تحلیل واریانس در جدول‌های **۵** و **۶** مشاهده می‌شود که مدل استفاده‌شده برای بررسی تأثیر متغیرهای مستقل بر متغیرهای وابسته در هر دو موتور معنا دار است و با استفاده از معادله چندجمله‌ای درجه دوم می‌توان آن را پیش‌بینی کرد. با بررسی مقدار p-value برای منابع مختلف در جدول **۵** می‌توان نتیجه گرفت که در موتور Euro2 نوع فیلتر (A)، دور موتور (B) و اثر متقابل نوع فیلتر و دور موتور (AB) در سطح ۱ درصد و ضرایب درجه دوم دور موتور (B^2) در سطح ۵ درصد تأثیر معناداری بر آوانس جرقه دارند. تأثیر ضرایب درجه دوم نوع فیلتر (A^2) در آوانس جرقه معنادار نبوده است. بررسی نتایج تحلیل واریانس موتور Euro4 نیز مشابه با موتور Euro2 در جدول **۶** انجام شده است. مشاهده می‌شود که در موتور Euro4 ضرایب درجه دوم دور موتور (B^2) در سطح ۱ درصد تأثیر معناداری بر آوانس جرقه دارد. همچنین میزان کم عدد باقیمانده‌ها (Residual)، عدم برازش (Lack of Fit) و خطای خالص (Pure Error) اعتبار مدل را نشان می‌دهند. در این تحلیل مجموع مربعات کل (Cor Total) نیز ارائه شده است.



شکل (۷): مقایسه نتایج واقعی با نتایج پیش‌بینی‌شده آوانس جرقه موتور (الف- موتور چهار سیلندر Euro2) (ب- موتور چهار سیلندر Euro4)

جدول (۵): تجزیه واریانس (موتور بنزینی Euro2)

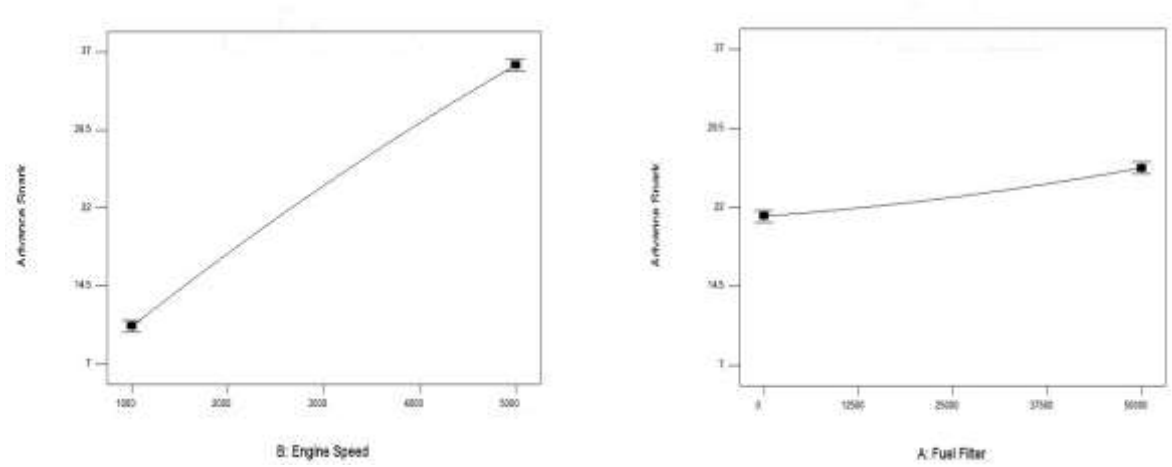
Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F. Value	p-value Prob > F
Model	1002.64	5	200.53	842.22	< 0.0001
A-Fuel filter	28.17	1	28.17	118.30	< 0.0001
B-Engine speed	962.67	1	962.67	4043.20	< 0.0001
AB	9	1	9.00	37.80	0.0005
A^2	0.69	1	0.69	2.90	0.1324
B^2	2.76	1	2.76	11.60	0.0114
Residual	1.67	7	0.24		
Lack of Fit	1.67	3	0.56		
Pure Error	0.000	4	0.000		
Cor Total	1004.31	12			

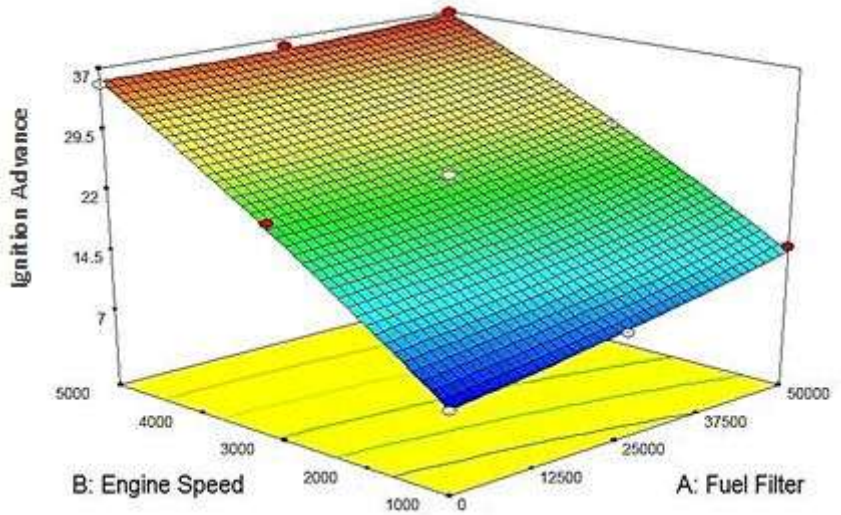
در شکل **۸** نمودارهای سطح پاسخ متغیر وابسته (آوانس جرقه) بر حسب تغیر توأم متغیرهای مستقل (کارکرد فیلتر و دور موتور) به‌صورت دوبعدی و سه‌بعدی در یک موتور Euro2 نشان داده شده است. در نمودار سه‌بعدی اثر متقابل (برهمکنش) میزان کارکرد فیلتر سوخت و دور موتور را بر آوانس جرقه می‌توان مشاهده نمود. با توجه به این نمودارها

مشاهده می‌شود که با افزایش کارکرد فیلتر و دور موتور، آوانس جرقه افزایش می‌یابد. نمودارهای دوبعدی نیز هر کدام به‌طور جداگانه اثر کارکرد فیلتر سوخت و دور موتور را بر آوانس جرقه نشان می‌دهند.

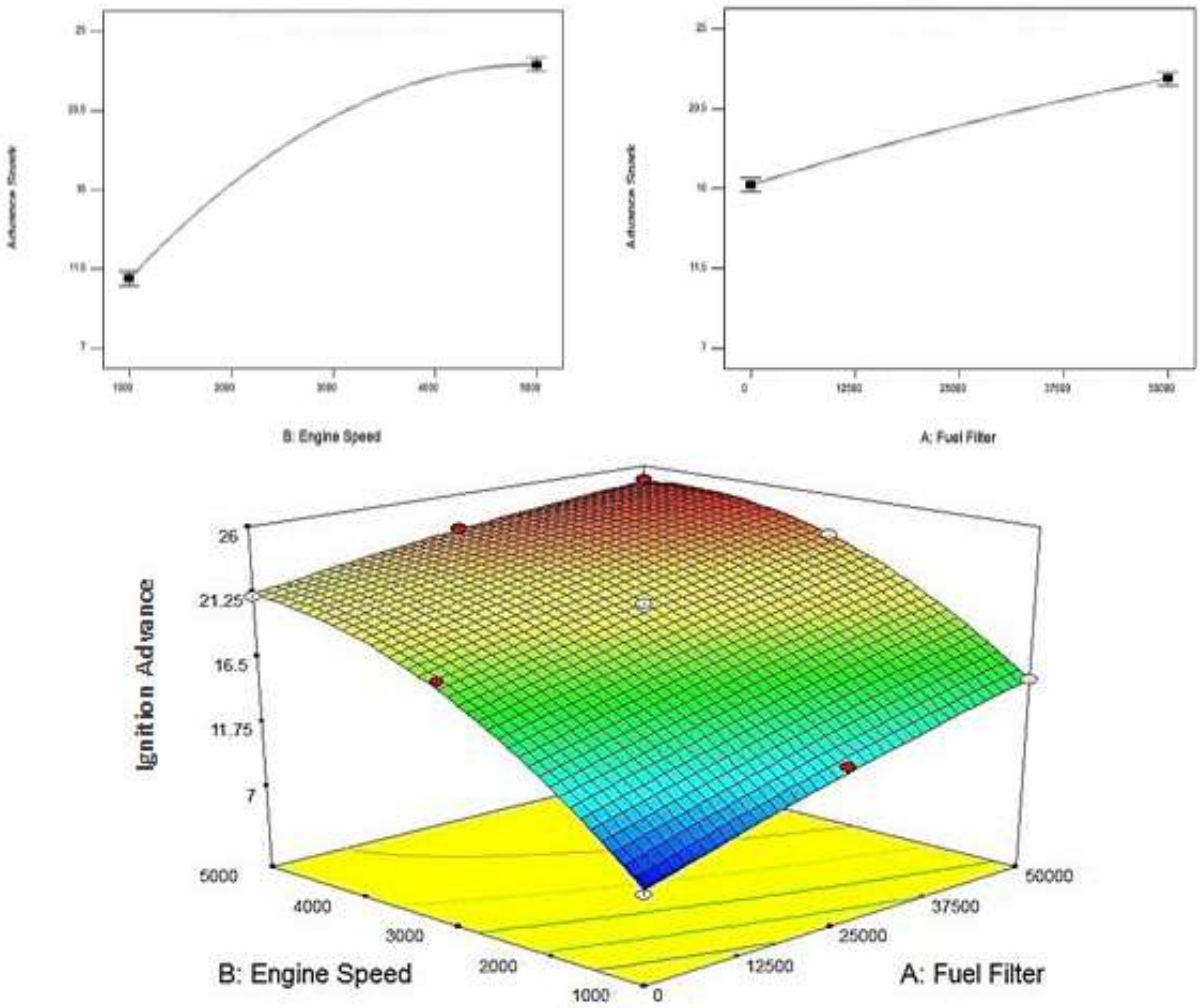
جدول (۶): تجزیه واریانس (موتور بنزینی Euro4)

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F. Value	p-value Prob > F
Model	296.70	5	59.34	516.25	< 0.0001
A-Fuel filter	48.17	1	48.17	419.05	< 0.0001
B-Engine speed	210.04	1	210.04	1827.36	< 0.0001
AB	4	1	4	34.80	0.0006
A^2	0.36	1	0.36	3.15	0.1192
B^2	26.75	1	26.75	232.72	< 0.0001
Residual	0.80	7	0.11		
Lack of Fit	0.80	3	0.27		
Pure Error	0.000	4	0.000		
Cor Total	297.50	12			





شکل (۸): اثر متقابل کارکرد فیلتر سوخت و سرعت موتور بر آوانس جرقه (موتور Euro2)

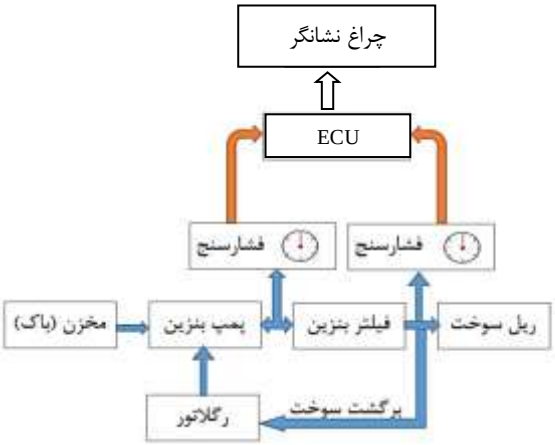


شکل (۹): اثر متقابل کارکرد فیلتر سوخت و سرعت موتور بر آوانس جرقه (موتور Euro4)

همچنین به‌طور مشابه، نمودار تغییرات آوانس جرقه به ازای تغییرات متغیرهای مستقل (کارکرد فیلتر و دور موتور) و اثر متقابل آنها برای موتور Euro4 در شکل ۹ مشاهده می‌شود. در نمودار سه‌بعدی این موتور نیز اثر متقابل (برهمکنش) میزان کارکرد فیلتر سوخت و دور موتور را بر آوانس جرقه می‌توان مشاهده نمود. با توجه به این نمودارها مشاهده می‌شود با افزایش کارکرد فیلتر و دور موتور آوانس جرقه افزایش می‌یابد. در نمودارهای دوبعدی به‌طور جداگانه اثر کارکرد فیلتر سوخت و دور موتور بر آوانس جرقه مشخص می‌باشد. با دقت در نتایج تجربی و تحلیل‌های آماری می‌توان دریافت که در صورت افزایش دور موتور، منحنی آوانس جرقه با شیب نسبتاً زیادی افزایش خواهد داشت. دلیل این پدیده، جبران نمودن زمان کوتاه جرقه‌زنی و بهبود احتراق متناسب با دورهای بالای موتور است. اما نکته حائز اهمیت آن است که در شرایط ایده‌آل، فیلتر سوخت نباید تأثیری بر آوانس جرقه داشته باشد. در صورتی که طبق نمودارهای اثر مستقل فیلتر سوخت در شکل‌های ۸ و ۹ مشاهده می‌گردد که افزایش کارکرد فیلتر سوخت اثر معناداری بر تغییر آوانس جرقه دارد. یعنی با افزایش طول عمر فیلتر سوخت، آوانس جرقه موتور نیز افزایش قابل توجهی خواهد داشت. در نتایج تجربی این تحقیق نیز روند مشابهی وجود داشت و دلیل رخ دادن این پدیده نیز در تفسیر نتایج تجربی این تحقیق توضیح داده شد. لذا نتایج تحلیل آماری و آزمون‌های تجربی مؤید همدیگر بوده و اهمیت نقش فیلتر سوخت و تعویض به‌موقع آن را در بهبود زمان‌بندی سامانه جرقه‌زنی و در نهایت کارایی موتور بنزینی نشان می‌دهند.

۳-۳- سامانه هوشمند کنترل و تعیین زمان تعویض فیلتر سوخت

نتایج تحقیق حاضر نشان می‌دهند که تعویض فیلتر سوخت در زمان مناسب و قبل از گرفتگی زیاد آن موجب افزایش عمر مفید اجزای سامانه سوخت‌رسانی، کاهش مصرف سوخت، کاهش آلاینده‌های خروجی از اگزوز و جلوگیری از آسیب‌های پدیده کوبش (از جمله تنش‌های ناشی از ضربه احتراق در سیلندر، پیستون و میل لنگ) خواهد شد. باید توجه داشت که کیفیت بنزین در کشورها و مناطق مختلف متفاوت است. همچنین طراحی، ساخت و رتبه کیفی فیلترهای سوخت نیز تفاوت دارند. در کنار عوامل ذکرشده قبلی، نوع پیمایش خودرو و شرایط کارکرد موتورها نیز متفاوت‌اند. به‌عنوان مثال بسیاری از موتورها در ماشین‌آلات صنعتی و کشاورزی دارای عملکردی به‌صورت درجا و ثابت هستند و دارای کارکرد کیلومتری نیستند. با در نظر گرفتن عوامل فوق مشخص است که میزان کارکرد کیلومتر خودرو به تنهایی نمی‌تواند شاخص دقیق و مناسبی جهت تشخیص زمان تعویض فیلتر سوخت باشد. تاکنون سامانهی کارآمد جهت تشخیص میزان گرفتگی فیلتر بنزین که بتواند عیب‌یابی و تعمیر را برای تعمیرکاران آسان‌تر کرده و به راننده جهت نگهداری و تعویض به‌موقع فیلتر سوخت هشدار دهد وجود نداشته است. بنابراین در این تحقیق یک سامانه هوشمند جهت کنترل و تعیین زمان تعویض فیلتر سوخت، کاهش فشار ریل سوخت و هشدار آن به راننده، معرفی شده است. در این سامانه دو عدد فشارسنج دیجیتالی، یک واحد کنترل الکترونیکی ECU و یک چراغ نشانگر یا LED مطابق شکل ۱۰ در مدار قرار می‌گیرد. در این سامانه به‌منظور افزایش دقت و کاهش خطا از دو عدد حسگر الکترونیکی فشار سیال استفاده شده است. حسگرها فشار ورودی و خروجی فیلتر سوخت را اندازه‌گیری کرده و اطلاعات را به واحد کنترل و پردازش الکترونیکی(ECU) جهت پردازش ارسال می‌کنند. پردازشگر با توجه به آزمایش‌های انجام‌شده برنامه‌نویسی شده است که فشار قبل از فیلتر را با فشار بعد از فیلتر مقایسه کرده و در صورت نیاز به تعویض فیلتر نتیجه آن در نمایشگر پشت صفحه آمپر به راننده گزارش می‌دهد.



شکل (۱۰): شماتیک سامانه هوشمند کنترل و تعیین زمان تعویض فیلتر

این سامانه باعث افزایش دقت، کاهش زمان پایش با کنترل فشار سامانه سوخت‌رسانی قبل از شروع اولین احتراق و روشن شدن موتور در زمان باز شدن سوئیچ می‌شود. همچنین علاوه بر آن کنترل آوانس جرقه توسط ECU نیز می‌تواند به افزایش دقت عملکرد این سامانه کمک کند. در این سامانه اختلاف بین دو فشار اندازه‌گیری شده قبل و بعد از فیلتر توسط ECU پردازش و با توجه به اختلاف فشار طبق آزمایش‌های انجام‌شده هشدار داده می‌شود. با توجه به این‌که سامانه مذکور را با آزمایش‌های متعددی در کلاس‌های مختلفی از موتورها و سامانه‌های سوخت‌رسانی مختلف می‌توان ارزیابی کرد، بنابراین برنامه‌نویسی آن را طبق کلاس موتورهای مربوطه با هر نوع سامانه سوخت‌رسانی می‌توان انجام داد و می‌توان شاخص مناسبی جهت تعویض به‌موقع فیلتر سوخت در اختیار داشت. مزایای استفاده از سامانه هوشمند کنترل و تشخیص گرفتگی فیلتر سوخت عبارت است از افزایش عمر مفید پمپ سوخت، افزایش عمر مفید انژکتورها، تمیزی انژکتورها، کاهش مصرف سوخت، کاهش آلایندگی خروجی از اگزوز، تأمین فشار مورد نیاز جهت پاشش سوخت، کنترل آوانس جرقه، کاهش میزان کوبش موتور، افزایش عمر قطعات اصلی موتور و افزایش کیفیت احتراق می‌باشد.

۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، تأثیر میزان کارکرد فیلتر سوخت بر مشخصه‌هایی از موتور مانند فشار سامانه سوخت‌رسانی و میزان آوانس جرقه بررسی شد. نتایج آزمایش‌های تجربی با

مدل آماری RSM مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. پس از انجام این تحقیق سامانه‌ای جهت کنترل و تعیین زمان تعویض فیلتر سوخت به کمک فشار سامانه سوخت‌رسانی طراحی شد. خلاصه‌ای از نتایج این تحقیق عبارت‌اند از :

۱- با افزایش میزان کارکرد فیلتر سوخت، گرفتگی فیلتر بیشتر شده و منجر به افزایش فشار در ناحیه قبل از فیلتر (بعد از پمپ بنزین) و درنتیجه مصرف بیشتر انرژی و کاهش عمر مفید پمپ بنزین می‌گردد. از طرفی گرفتگی فیلتر سوخت باعث کاهش فشار در ناحیه بعد از فیلتر یا همان فشار ریل سوخت شده و بر کیفیت تزریق سوخت توسط انژکتورها اثر منفی دارد. زیرا کاهش فشار تزریق سوخت منجر به کاهش میزان اتمیزه شدن سوخت در زمان پاشش انژکتورها و عدم تنظیم صحیح نسبت وزنی هوا به سوخت و رقیق شدن مخلوط خواهد شد. این امر در نهایت سبب کاهش کیفیت احتراق در محفظه احتراق می‌شود.

۲- افزایش کارکرد فیلتر بنزین بر سامانه جرقه‌زنی تأثیر قابل توجهی دارد. به این دلیل که ECU به‌منظور بهبود فرایند احتراق در حالتی که مخلوط سوخت و هوا رقیق باشد، میزان آوانس جرقه شمع را افزایش می‌دهد که خود باعث بُروز عوارض بعدی همچون پیدایش پدیده کوبش، کاهش عمر قطعات اصلی موتور، افزایش دمای اگزوز و در نتیجه افزایش برخی از آلاینده‌های خروجی از اگزوز موتور خواهد شد.

۳- بیشترین فشار مدار قبل از فیلتر و در سامانه سوخت‌رسانی موتور Euro2 در فیلتر با کارکرد ۵۰.۰۰۰km برابر با ۴٫۵bar و کمترین فشار قبل از فیلتر در سامانه سوخت‌رسانی موتورEuro2 و Euro4 با فیلتر نو مقدار یکسان ۳٫۵ bar اندازه‌گیری شد. همچنین کمترین فشار ریل سوخت (فشار منطقه بعد از فیلتر سوخت) در سامانه سوخت‌رسانی موتور Euro2 با فیلتر با کارکرد ۵۰.۰۰۰km به میزان ۲٫۵ bar اندازه‌گیری شد. این نتایج نشان می‌دهند که در هر دو نسل از موتور، افزایش عمر فیلتر سوخت باعث کاهش مقدار فشار سامانه سوخت‌رسانی خواهد شد.

۴- در موتور Euro2 و Euro4 کمترین میزان آوانس جرقه در دور موتور ۱.۰۰۰rpm به اندازه ۷ درجه با فیلتر نو مشاهده شد و بیشترین میزان آوانس جرقه در موتور Euro2 در دور موتور ۵.۰۰۰rpm به میزان ۳۷ درجه و با فیلتر با کارکرد ۵۰.۰۰۰km اندازه‌گیری شد. این نتایج نشان می‌دهند که در هر دو نسل از موتور افزایش کارکرد فیلتر سوخت باعث افزایش معناداری در میزان آوانس جرقه در سامانه جرقه‌زنی خواهد شد.

۵- در این مطالعه روش سطح پاسخ (RSM) به‌عنوان روشی مناسب برای پیش‌بینی و تحلیل داده‌های تجربی مشاهده شد و توانست با دقت بالا به کمک یک معادله چندجمله‌ای درجه دوم میزان آوانس جرقه موتور با فیلترهای مختلف و دورهای متفاوت موتور را پیش‌بینی و تحلیل کند.

۶- با توجه به طراحی سامانه هوشمند کنترل و تعیین زمان تعویض فیلتر سوخت می‌توان از زمان مناسب جهت تعویض فیلتر سوخت در موتور مطلع شد، که این امر باعث افزایش سلامت سامانه سوخت‌رسانی، سامانه جرقه‌زنی و قطعات اصلی موتور با کنترل فشار سوخت، کاهش آوانس جرقه و کاهش کوبش در موتور می‌گردد. همچنین در عیب‌یابی و تعمیر موتور به تعمیرکاران و در نگهداری و سرویس به‌موقع فیلتر سوخت و سامانه سوخت‌رسانی به رانندگان کمک خواهد کرد.

۵- مراجع

1. Ahmad, A., Aminian, S. Najafzadeh, D., and Ghajarieh, K. "Fuel and Ignition Systems in Passenger Cars", Publishing Iranian textbooks, 2015 (In Persian).
2. Ghanbari, M. "Technology and Design of Internal Combustion Engines", Technical and Vocational University Press, Tehran, Iran, 2019. (In Persian).
3. Eberhardt, J. "Fuels of the Future for Cars and Trucks", Diesel Engine Emissions Reduction (DEER) Workshop press, California, America, 2002.
4. Yaghoobzadeh, N. and Katanchi, M. "Optimal Location of Fuel Supply", Proc. Int Conf on New Research Achievements in Tehran Architectural and Civil Eng, 2015 (In Persian).
5. Ejtehadi, R. "Fuel Systems and Filtration Principles", Proc. 3rd National Maintenance Conf, Tehran, Maintenance Association, 2005 (In Persian).
6. Jafarian Jelodar, M. and Momeni, E. "Complex Refrigeration Simulation Algorithm and Response Surface Methodology in Solving Optimization Problems (A Case Study of Car Fuel Filter)", 3RD Int Conf on Research in

Operations in Iran, Tehran, Amir Kabir University, 2009. (In Persian).

7. Ghafari, H., Seyedi, S.M., and Mostafaei, A. “Investigating the Cause of Birjand Bus Organization Emissions and Estimate the Approximate Cost of Troubleshooting”, Proc. Int Conf on Architecture, Civil and Urban Enviro, Hamadan, Tehran, 2014. (In Persian).
8. Gailis, M. and Pirs, V. “Research in Influence of Engine Air Filter Replacement Periodicity”, Eng for rural development, Jelgava, No.5, pp. 173-178, 2011.
9. Allam, S. and Elsaid, A. "Parametric Study on Vehicle Fuel Economy and Optimization Criteria of the Pleated Air Filter Designs to Improve the Performance of an I.C Diesel En-gine: Experimental and CFD Approaches", Separation and Purification Tech, No. 241, pp. 116680. 2020.
10. Thomas, T., West, B., and Huff, S. "Effect of Air Filter Condition on Diesel Vehicle Fuel Economy", SAE Technical Paper, Report No. 0148-7191. 2013.
11. Sharma, N. and Kumar Agarwal, A. “Effect of Fuel Injection Pressure and Engine Speed on Performance, Emissions, Combustion, and Particulate Investigations of Gasohols Fuelled Gasoline Direct Injection Engine", J. Energy Resour Technol. Vol. 142, No.4, pp. 042201-042212. 2020.
12. Kamyab, M., Vahedi, KH., And Esfande, S. “Numerical Simulation of Fluid Flow in Portable Helicopter Refueling Systems: With a Focus on Simulating Fluid Behavior in the Fuel Filter and Refueling Systems", 5th National Conf. on Defense Science and Engineering, Tehran, Imam Hossein University, 2020.
13. Rahmatinejad, B. and Akbarloo, M. “Investigation of Gasoline Filter Obstruction on a Linear Four-Cylinder Engine”, Proc. Int Conf on New Approaches in Eng Sci, Teflis, Georgia, 2017. (In Persian).
14. Durbin, TD., Zhu, X., and Norbeck, JM. "The Effects of Diesel Particulate Filters and a Low-Aromatic, Low-Sulfur Diesel Fuel on Emissions for Medium-duty Diesel Trucks", Atmospheric Env, Vol. 37, No.15, pp. 2105-16. 2003.
15. Nasrabadi, M. and Kakayi, A. “Investigation of the Effect of Operating Conditions on Knock Limited Spark Advance and Octane Requirement in Internal Combustion Engine", Aeromechanics J. Vol. 9, No.1, PP 1 – 14. 2012. (In Persian).
16. Ghanbari, M. Mozafari Vanani, L., and Rahimi Asiabaraki, H. "Investigation of the Effect of Gasoline Engine Fuel Filter Operation on Spark Advance", Proc. 11th Int Conf on internal combustion engines & oil. Tehran, Iran, 2020. (In Persian).
17. Almasi, S., Najafi, Gh., and Ghobadian, B. “Optimization of Biodiesel Production Process from Non-edible Rapeseed Using Response Surface Method (RSM)”, Fuel and Combustion. Vol. 11, No. 4, 2018, pp. 1-13. (In Persian).
18. Jalilitabar, F., Momeni, M., and Momeni, E. “Optimizing the EGR Rate, Biodiesel Fuel Ratio and Engine Working Mode Using RSM Method”, Fuel and Combustion, Vol. 10, No. 3, 2017. (In Persian).
19. Dhole, A. E., Yarasu, R. B., Lata, D. B., and Baraskar, S. S. “Mathematical Modeling for the Performance and Emission Parameters of Dual Fuel Diesel Engine Using Hydrogen as Secondary Fuel”, Int J. Hydrogen Energ, Vol. 39, pp. 12991-13001. 2014.
20. Shaabani, Z., Rafiee, SH., Ghobadian, B., and Ahmadi, H. “Optimization of Performance in Tractor Engine with Biodiesel Ethanol Diesel Fuels Using Response Surface Methodology”, The J. Engine Research., No. 29, pp. 15-24. 2013. (In Persian).
21. Lleri, E,. Karaoglan, A,D. and Atmanli, A. "Response Surface Methodology Based Prediction of Engine Performance and Exhaust Emissions of a Diesel Engine Fuelled with Canola Oil Methyl Ester", J. Renewable Sustainable Energy, Vol. 5, 033132. 2013.
22. Datta Bharadwaz, Y., Govinda Rao, B. Dharma Rao, V., and Anusha, C. "Improvement of 804 Biodiesel Methanol Blends Performance in a Variable Compression Ratio Engine Using Response 805 Surface Methodology", Alexandria Eng J. Vol. 55, No.2, pp. 1201-1209. 2016.
23. Meyers, R.H. and Montgomery, D.C. "Response Surface Methodology, Process and Product Optimisation Using Design Experiments", Second Edition, pp. 170-173, Willey, New York, NY, 2002.
24. Moradi, M. and Abdollahi, H. "Statistical Modelling and Optimization of the Laser Percussion Microdrilling of Thin Sheet Stainless Steel", Laser. Eng., Vol. 40. No, 4-6, pp375-393. 2018.
25. Shamsborhan, M., Moradi, M., and Shokuhfar, A. "Numerical Optimization of Planar Twist Channel Angular Extrusion as a Novel Severe Plastic Deformation Method by DOE Method", Modares Mech Eng, Vol. 16, No. 5, pp. 135-144, 2017. (in Persian)
26. Ranjbar, I., Ghasemzadeh, H., and Davoodi, SH. "Engine Power and Tractor", University of

Tabriz Publications, Tabriz, Iran, 2011. (In Persian).

27. Ghanbari, M. Najafia, G., Ghobadian, B., Yusaf, T., Carlucci, A.P., and Kiani Deh Kiani, M. "Performance and Emission Characteristics of a CI Engine Using Nano Particles Additives in Biodiesel-Diesel Blends and Modeling with GP Approach", Fuel J., Vol. 202, PP. 699-716, 2017.

28. Jahanian, O., Jazayeri, A., and Ebrahimi. R. "Investigation of the Effect of Spark Advance, Compression Ratio and Percentage of Incoming Air Humidity on the Probability of a Knock in a Spark Ignition Engine with Methane Fuel", 5th Int Conf on internal combustion engines & oil. Tehran, Iran, 2008. (In Persian).