

پایش وضعیت موتور تراکتور ITM285 با بهره‌گیری از تحلیل صدا و پارامترهای عملکردی موتور

مجید حسنی^۱، محمد حسین عباسپور فرد^۲ و امید دوستی ایرانی^۳

چکیده

پایش وضعیت یکی از عناصر اصلی در نگهداری پیشگیرانه است. با استفاده از پایش وضعیت می‌توان برنامه‌ریزی کرد و یا اقداماتی انجام داد که از اثرات پس‌آیندی شکست یک ماشین؛ پیش از اتفاق افتادن شکست جلوگیری شود. در ایران اجرای پایش وضعیت تراکتور و بازبینی و نگهداری آن مورد کم‌توجهی قرار می‌گیرد و یا بر اساس ساعت دقیق کارکرد اجرا نمی‌شود. در این پژوهش تأثیر عدم بازبینی فیلتر هوا (فیلتر کثیف) و عدم تنظیم لقی سوپاپ (لقی بیش‌تر و کم‌تر) به‌طور مستقل و توأم بر روی صدای و پارامترهای عملکردی موتور، شامل دمای خروجی اگزوز، میزان مصرف سوخت و کدوری دود در تراکتور ITM285 مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که تغییرات گشتاور و دور موتور بر میزان کدوری دود موتور اثر معنی‌داری داشته و همه عوامل بر میزان مصرف سوخت اثر معنی‌داری دارند. از طرفی دیگر میزان تمیز بودن فیلتر هوا، تغییرات گشتاور و دور موتور بر روی دمای موتور نیز اثر معنی‌داری دارند. همچنین تغییرات گشتاور و دور موتور و میزان لقی سوپاپ بر صدای سرسیلندر موتور اثر معنی‌داری دارند. نتایج همچنان نشان داد که تغییرات دور موتور بر صدای بدنه موتور تأثیر معنی‌داری می‌گذارد.

واژه‌های کلیدی: پارامترهای عملکردی موتور، پایش وضعیت موتور، تحلیل صدا، تراکتور ITM285، لقی سوپاپ.

ارجاع: حسنی م.، عباسپور فرد م. ح. و دوستی ایرانی ا. ۱۴۰۱. پایش وضعیت موتور تراکتور ITM285 با بهره‌گیری از تحلیل صدا و پارامترهای عملکردی موتور. نشریه پژوهش‌های مکانیک ماشین‌های کشاورزی. ۲۵: ۴۲-۳۱. <https://dx.doi.org/10.22034/JRMAM.2022.10149.561>

۱- کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد.

۲- استاد گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد.

۳- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد.

* نویسنده مسئول: abaspour@um.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۰/۱۸ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۳/۰۸

مقدمه

پایش وضعیت عاملی حیاتی در نگهداری تجهیزات و پیشگیری خرابی آنها است. هدف از پایش وضعیت نظارت بر وضعیت عملکرد دستگاه و به دست آوردن آثار و نشانه‌ی وضعیت دستگاه است، زمانی که دستگاه در حال انجام عملیات هست، به‌طوری‌که دستگاه بتواند به‌صورت اقتصادی و ایمنی نگهداری شده یا فعال بماند. (Lærum, 2018) یک سامانه شناسایی عیوب کارا، باید به‌محض اینکه علامتی از نقص در ماشین ظاهر شد به کاربر هشدار دهد تا سریعاً عملیات تصحیح عیب انجام شود (Das et al., 2019).

پایش وضعیت به عنوان یکی از روش‌های جدید تعمیر و نگهداری، به صورت سنجش منظم پارامترهای مناسب ماشین و مقایسه آن‌ها با مقادیر به دست آمده تعریف می‌شود (Zhou et al., 2019). روش‌های مختلف پایش وضعیت در موتورهای احتراق داخلی عبارت‌اند از: تحلیل ارتعاشات، تحلیل روغن، تحلیل صدا، تحلیل بازده، تحلیل فشار درون سیلندر، تحلیل ترموگرافی و تحلیل سامانه خنک‌کننده (Jafari et al., 2009). صدای موتور به‌عنوان یکی از انواع آلودگی‌های زیست‌محیطی تهدیدی جدی برای سلامت جامعه و بقای موجودات زنده است (Cai et al., 2019). آلودگی صدا یکی از مشکلات شهری شهروندان محسوب می‌شود که مسئله رو به رشدی است و آثار بالقوه‌ای بر سلامت مردم دارد (Akay & Acar, 2018). تأثیر سرعت دورانی موتور در چهار سطح (۱۳۵۰، ۱۵۰۰ و ۱۶۵۰ rpm)، بار موتور در چهار سطح (۵۵، ۷۰، ۸۵ و ۱۰۰ درصد بار کامل) و زاویه پاشش سوخت در پنج سطح (۲۲، ۲۷، ۳۲، ۳۷ و ۴۲ درجه قبل از نقطه مرگ بالا) بر میزان کدری دود اگزوز یک موتور دیزل تک سیلندر آب خنک با پاشش مستقیم بررسی شد. نتایج نشان داد که بار موتور و زاویه‌ی پاشش سوخت، بیشترین اثر را بر روی کدری دود اگزوز داشتند. با توجه به سطوح بار موتور، این نتایج برای بارهای پایین (کم‌تر از ۵۵ درصد بار کامل) معتبر نیست. همچنین منظور از زاویه پاشش سوخت، زاویه مخروط پاشش در سر انژکتور نیست بلکه اشاره به زمان‌بندی پاشش دارد (Abbaszadeh, Ghobadian, 2008). در پژوهشی به بررسی تأثیر سوخت بیودیزل بر روی صدای موتور پرداخته شد. نتایج نشان داد که فرکانس غالب صدای موتور، 315 Hz و با منشأ احتراق

و ساختار اگزوز است. در این فرکانس، تراز فشار صدای موتور با سوخت B10، ۲۳ درصد کمتر از سوخت B30 بود. کمترین صدای تولیدی موتور در مخلوط سوخت B10، و بیشترین صدای تولیدی در B30 اتفاق می‌افتد (Nemat Keramat et al., 2017). منابع ایجاد صدا در قسمت جلوی یک موتور دیزل در پژوهشی بررسی شد و نشان داده شد که با استفاده از اندازه‌گیری تراز شدت صدا می‌توان منابع ایجاد صدا را مشخص نمود (JunHong & Bing, 2005). پژوهشگران طی تحقیقاتی که روی موتور دیزل هشت سیلندر یک خودروی نظامی انجام دادند دریافتند که وقتی دور موتور به ۱۹۰۰ و ۲۲۰۰ دور بر دقیقه می‌رسد، به ترتیب تأثیر صدای سیستم هوای ورودی و اگزوز بیشتر می‌شود. سطح تراز صدا در نزدیکی لوله ورودی هوا و اگزوز به ۱۲۰ دسی‌بل می‌رسد و با توجه به تصاویر طیف‌های فرکانسی، فرکانس صدای موتور با فرکانس عملکرد موتور انطباق نزدیکی دارد (Guangpu et al., 2006). همچنین روش جدیدی در عیب‌یابی موتور احتراق داخلی، به وسیله سیگنال‌های صدا و ارتعاش حاصل از موتور به کار گرفته شده است (Wu et al., 2008) که در این روش از یک طرح نقطه بصری استفاده شده است. سه حالت از دوره موتور که در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفته عبارت بودند از: ۱ - حالت بدون ضربه، ۲ - حالتی که ضربه در حال افزایش بود، ۳ - حالتی که همراه با ضربات سنگین بود. ملاک تشخیص، ارتعاشات گرفته‌شده از بدنه موتور و اساس کار در این روش عیب‌یابی، شناخت الگو در نظر گرفته شد. داده‌های مربوط به سه حالت فوق به‌وسیله یک شتاب‌سنج دقیق دریافت شد. برای این منظور از ابزار تحلیلی مقیاس- زمان که تبدیل موجک نامیده می‌شود استفاده شده است. پژوهشگران طی تحقیقات خود بر روی تراکتور در حال حرکت روی جاده آسفالت روستایی نشان دادند که صدا در موقعیت گوش راننده در مقایسه با موقعیت اطرافیان، ۷/۷۴ تا ۱۰/۷۵ دسی‌بل بیشتر است. نتایج تحقیقات آنها نشان داد که موتور نقش تعیین‌کننده‌ای بر شدت سر و صدا دارد. (Hassan-Beigi & Ghobadian, 2005) در پژوهشی صدای ناشی از احتراق موتور را از صدای ناشی از فرایندهای مکانیکی موتور جدا نمودند و دریافتند که هم دور موتور و هم بار روی آن بر شدت صدای ایجاد شده مؤثر است. همچنین پژوهشگران پیشنهاد کردند که

تحقیقات ادامه یابد تا مشخص شود در شرایط مختلف در چه سطح فشار صدا و در چه مقیاس سروصدا شنوایی از دست می‌رود (Pruvost et al., 2009). در پژوهشی، سروصدای احتراق با استفاده از سوخت بیودیزل در شروع کار با یک موتور پرخوران شده بررسی شد (Rakopoulos et al., 2011). این آزمایش با سه نوع سوخت دیزل، بیودیزل B25 و B30 انجام شد. نتایج این تحقیق نشان داد که استفاده از سوخت بیودیزل تأثیر چندانی در کاهش صدای ناشی از احتراق موتور ندارد. در پژوهشی به ارزیابی مواجهه کاربر با ارتعاش و صدای تولید شده توسط یک تیلر دوار باغی پرداخته شد. طبق نتایج به دست آمده در این تحقیق، میزان مواجهه با ارتعاش دست و بازو بیش از میزان استانداردها بوده و باعث ایجاد ناراحتی و اختلالات عضلانی ناشی از ارتعاش می‌گردد. بیشترین مواجهه با ارتعاش در حالت شخم زدن و در جهت کف به پشت دست بیشتر از دو جهت دیگر یعنی پهنای دست و امتداد طول دست بوده است. بین تراز صدا در موقعیت گوش راننده و اطرافیان در هر سه حالت کاری در سطح ۵ درصد اختلاف معنی‌دار وجود داشت. بیشترین میزان مواجهه با تراز صوت در مرحله شخم زدن و کمترین در هنگام درجا کار کردن تیلر است. نتایج این مطالعه بر لزوم تحقیقات بیشتر جهت حذف و کاهش ارتعاش و صدای موتور تیلر به عنوان منبع اصلی تولید ارتعاش و اقدامات مدیریتی جهت کاهش مواجهه و استفاده از حفاظت‌های فردی تأکید دارد (Tabatabaei Kolor et al., 2018).

در تحقیقی دیگر یک الگوریتم اندازه‌گیری صدای احتراق توسعه یافت تا شاخص تولید صدا و پیشینه نرخ افزایش فشار را با سطح صدای احتراق مقایسه کنند. تعداد زیادی از موتورهای که در حالت پایدار کار می‌کردند از جمله موتورهای با اشتعال تراکمی معمولی، موتورهای اشتعال جرقه‌ای و موتورهای احتراق دمای پایین آزمون شدند (Shahlari et al., 2014).

همچنین با استفاده از روش توزیع وینگر- وایل و با به کارگیری روش فیلترهای وفقی، صدای ناشی از سوزن انژکتورهای موتور را شناسایی نمودند. روش توزیع وینگر- وایل در مقایسه با روش‌های مشابه، جذابیت کاربرد بیشتری دارد. بدین دلیل که این روش فرضیه ایستایی کوتاه‌مدت سیگنال را نادیده می‌گیرد و به مشکل تفکیک‌پذیری بین زمان و فرکانس غلبه می‌کند. اما این

روش عیب‌هایی را در نمایش طیف‌های به‌دست‌آمده دارد که هم‌پوشانی طیفی نامیده می‌شود. گاهی تداخل حاصل از هم‌پوشانی طیفی به عدم شناسایی فرکانس‌های ارتعاشی می‌انجامد (Albarbar et al., 2010). پژوهشگران روش تبدیل موجک پیوسته را برای تحلیل سیگنال‌های موتور، تحلیل فرکانسی مناسبی ندیده و از روش A-Weighted CWT برای تحلیل زمان- فرکانس استفاده کردند. این روش، خروجی بهتری از صداهای ناپایدار به دست می‌دهد که برای معرفی منابع صدا بسیار مؤثر است (Anyu et al., 2011). همچنین صدای یک موتور دیزل با توربوشاژر را در شرایط مختلف از جمله حالت رانندگی در جاده، شتاب‌گیری و افزایش بار آزمایش کردند. برای به دست آوردن توربوشاژر در موتور، یک بستر آزمون با تمامی امکانات فراهم شد. برای تعریف چگونگی انتشار صدای احتراق، از اندازه‌گیری فشار درون سیلندرها، عکس‌العمل توربوشاژر و گاورنر پمپ سوخت استفاده کردند. نتایج نشان داد جواب با تأخیر پرخوران به تغییرات دریچه گاز، بیشترین تأثیر را در تولید صدا دارد. دقت کالیبره کردن زمان پاشش سوخت تأثیر به‌سزایی بر سطح صدای تولیدی موتور دارد. دمای دیواره سیلندر با تغییر شرایط سوخت نمی‌تواند خود را تطبیق دهد، که همین امر باعث تولید صدا می‌گردد (Giakoumis et al., 2011). همان‌طور که مشاهده شد تحقیقات پیشین اثر متغیرهای لقی، فیلتر هوا، گشتاور و دور موتور را به‌صورت تکی بر روی عامل‌های عملکردی موتور مورد بررسی قرار داده‌اند. در این تحقیق تأثیر این عامل‌ها به‌صورت یک‌جا بر روی عامل‌های عملکردی موتور مورد بررسی قرار خواهد گرفت، همچنین در بسیاری از تحقیقات اثرات متقابل این عوامل مورد بحث و بررسی قرار نگرفته است که در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفته است. دو عیب تنظیم نبودن لقی سوپاپ و کثیفی فیلتر هوا در موتور دیزل ایجاد و تأثیر این دو عیب بر روی صدای موتور و عامل‌های عملکردی موتور سنجیده شد. فیلتر و لقی سوپاپ، هردو در میزان حجم هوای ورودی به سیلندر و در نتیجه در بازده حجمی موتور تأثیرگذارند. لذا هدف از این تحقیق بررسی اثر لقی سوپاپ و میزان کثیفی فیلتر هوا بر روی صدا و عامل‌های عملکردی موتور تراکتور ITM285 با استفاده از تحلیل صدا و اندازه‌گیری پارامترهای موتور است.

مواد و روش‌ها

به منظور بررسی اثرات تنظیم نبودن لقی سوپاپ و کثیفی فیلتر هوا بر پارامترهای موتور (کدوری دود، دمای دود خروجی اگزوز، دبی جرمی مصرف سوخت و صدای موتور) این دو عیب در موتور تراکتور ITM285 ایجاد و پارامترهای موتور تحت شرایط مختلفی از کارکرد فیلتر هوا و لقی سوپاپ‌ها اندازه‌گیری و ثبت شد. آزمایش‌ها به‌صورت طرح چند عاملی در قالب طرح بلوک‌های کاملاً تصادفی با انجام شد. فاکتور اول، میزان تمیزی فیلتر هوا در دو سطح (تمیز و کثیف) و فاکتور دوم میزان لقی سوپاپ در سه سطح (عادی معمولی، بیشتر و کمتر) است (جدول ۱). میزان لقی عادی بر اساس دفترچه راهنمای کارخانه سازنده ITM285 لحاظ شده است. میزان کثیفی فیلتر هوا بر مبنای میزان افت فشار مؤثر (حدود ۵ درصد) نمایش داده شده در خلأسنج‌های قبل و بعد از فیلتر هوا است (Anvarinia et al., 2015).

جدول ۱- میزان لقی سوپاپ مورد بررسی در تراکتور ITM285

لقی بیش‌تر (mm)		لقی عادی (mm)		لقی کم‌تر (mm)	
دود	هوا	دود	هوا	دود	هوا
۰/۴۰	۰/۳۵	۰/۳۵	۰/۳۰	۰/۳۰	۰/۲۵

عامل سوم دور موتور در سه سطح ۱۲۵۰، ۱۷۳۰، ۲۲۰۰ دور بر دقیقه و عامل چهارم میزان بار یا گشتاور اعمالی به موتور در پنج سطح (طبق استاندارد ۲۵۶۸ سازمان استاندارد ایران، از صفر تا ۸۵ درصد بار بیشینه) است. مقادیر بار موتور بر اساس حداکثر گشتاور ۲۰۰ نیوتن متر در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۲- معادل‌سازی میزان درصد بار اعمالی با گشتاور

بار موتور (درصد)	گشتاور موتور (نیوتن-متر)
.	.
۲۵	۵۰
۵۰	۱۰۰
۷۵	۱۵۰
۸۵	۱۷۰

در جدول ۳ متغیرهای مستقل و وابسته مورد استفاده در تحقیق بیان شده‌اند.

جدول ۳- متغیرهای مستقل و وابسته آزمون

متغیر مستقل	متغیر وابسته
فیلتر در دو سطح	دما
لقی در سه سطح	کدوری دود
دور موتور در سه سطح	سوخت مصرفی
بار یا گشتاور در پنج سطح	تراز شدت صدا (صدا)

تجهیزات مورد نیاز

برای انجام آزمایش از تجهیزاتی چون، موتور دیزل تراکتور ITM285، دینامومتر اصطکاکی-هیدرولیکی (شکل ۱) با گردش آب، مدل Plint (انگلستان) با حداکثر ظرفیت بارگذاری ۳۲۵ نیوتن-متر به منظور تبدیل دور دینامومتر به دور موتور و بالعکس (جدول ۵) استفاده شد. دینامومتر با اتصال از طریق محور PTO، گشتاور مورد نظر را به موتور تراکتور وارد می‌کند. میکروفن که به فاصله ۱۰ میلی‌متری بدنه موتور و ۱۰ میلی‌متری سرسیلندر قرار گرفت، جهت تشخیص صدا و دستگاه صدا سنج مدل Tes1358 جهت اندازه‌گیری و ثبت صدای موتور، ترمومتر مدل TM-902c جهت اندازه‌گیری دمای خروجی اگزوز، ترازوی دیجیتالی مدل A&D-GF-6100 با دقت ۰/۰۱ گرم جهت اندازه‌گیری دبی جرمی مصرف سوخت، دستگاه کدوری‌سنج مدل MAHA MDO2 جهت اندازه‌گیری میزان کدوری دود اگزوز و دو عدد خلأسنج مدل OPF با دقت ۱۰ میلی‌متر جیوه برای اندازه‌گیری افت فشار قبل و بعد از فیلتر هوا استفاده شد. تراکتور مورد آزمایش در شکل ۱ نمایش و مشخصات فنی آن نیز در جدول ۴ بیان شده است.

با توجه به استاندارد موتور، آزمایش باید در دور مشخص یا نامی تراکتور (۱۷۳۰ rpm) انجام شود (انتخاب بر اساس کتابچه راهنمای دستگاه). همچنین لازم به ذکر است که هنگامی که دور محور PTO در حالت ۵۴۰ rpm انتخاب شود، دور مشخصه موتور برابر با ۱۷۳۰ rpm است و با توجه به این که در این آزمون سه دور باید مورد مطالعه قرار می‌گرفت از این رو با توجه به دور حداکثر و حداقل و انجام پیش‌آزمون و با استفاده از میانگین‌گیری دو دور ۱۲۵۰ و ۲۲۰۰ rpm به دست آمد. به منظور تجزیه و تحلیل نتایج از نرم‌افزار Minitab18 استفاده شد.

نتایج و بحث

در ابتدا برای هر متغیر پاسخ شرط نرمال بودن مورد آزمون قرار گرفته است. سپس اثرات اصلی و متقابل در جدول تجزیه واریانس آورده شده و در پایان هر قسمت نمودارهای مربوط به اثرات متقابل دوگانه بیان و مورد بررسی قرار گرفته است.

برای فیلتر هوا منظور از فیلتر ۱ حالت تمیز و منظور از فیلتر ۲ حالت کثیف است. در ضمن منظور از (L1) شدت صدا در نقطه یک یا سرسیلندر و منظور از (L2) تراز کلی شدت صدا در نقطه دو یا بدنه موتور است.

بررسی اثر فیلتر، لقی سوپاپ، دور و گشتاور موتور

بر کدوری دود

مطابق نتایج حاصله، خطای معیار برآورد 0.0604917 ، ضریب تبیین $89/25$ درصد، ضریب تبیین تعدیل یافته $81/59$ درصد و ضریب تبیین پیش بینی $67/78$ به دست آمد. به عبارت دیگر، تقریباً 81 درصد تغییرات متغیر کدوری توسط مدل توجیه شده است. جدول ۶ نتایج حاصل از تحلیل واریانس را نشان می‌دهد. طبق جدول ۶ اثرات اصلی گشتاور و دور و اثرات متقابل لقی و فیلتر، لقی و دور و گشتاور و دور در سطح 5 درصد و همچنین گشتاور و دور نیز در سطح یک درصد معنادار هستند. با توجه به معنادار بودن اثرات متقابل، تحلیل اثرات اصلی کمک شایان توجهی به تحلیل نمی‌کند. برای بررسی بیشتر نمودار اثرات متقابل رسم شده است.



شکل ۱- دینامومتر اصطکاکی - هیدرولیکی (چپ) و تراکتور ITM285 (راست)

جدول ۴- مشخصات تراکتور ITM285

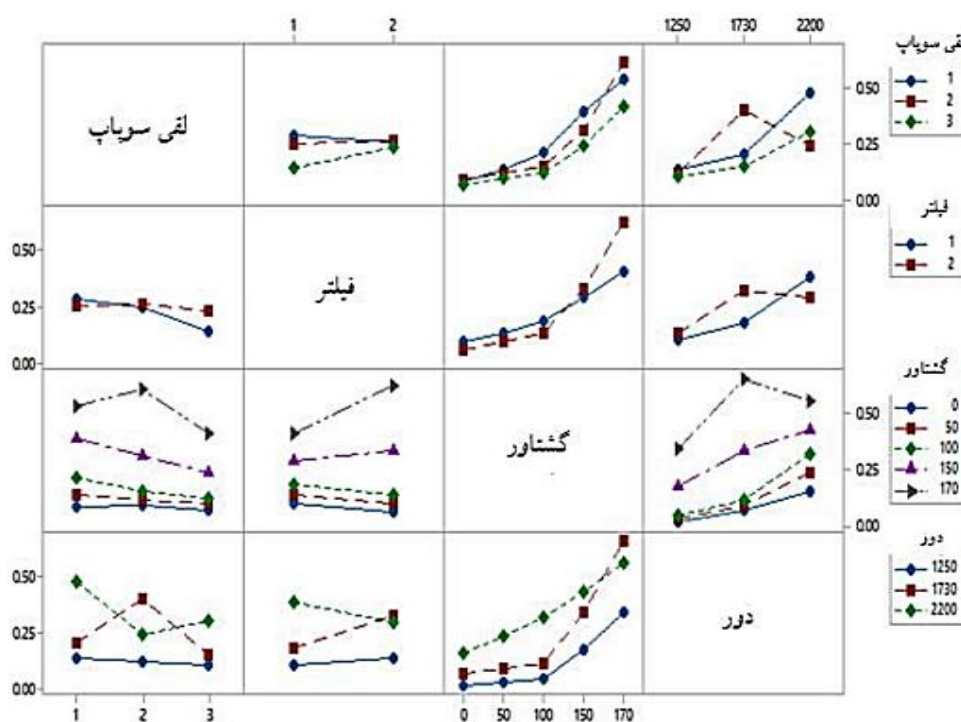
عنوان	مشخصات
نوع موتور	پرکینز، چهار سیلندر، چهارزمانه
سال ساخت	۱۳۸۴
قطر سیلندر	۱۰۱mm
کورس پیستون	۱۲۷mm
نسبت تراکم	۱۶:۱
نوع سوخت	سوخت دیزل (گازوئیل)
نوع پمپ انژکتور	آسیابی
حداکثر قدرت	۷۵ hp در سرعت ۲۰۰۰ rpm
سرعت محور توان دهی	۵۴۰ rpm

جدول ۵- تبدیل دور دینامومتر به دور موتور و بالعکس

دور دینامومتر (rpm)	دور موتور (rpm)
۱۵۷۵	۱۲۵۰
۲۱۸۰	۱۷۳۰
۲۷۷۲	۲۲۰۰

جدول ۶- تجزیه واریانس برای متغیر کدوری دود

منبع تغییر	درجه آزادی	مجموع مربعات تعدیل یافته	میانگین مجموع مربعات تعمیم یافته	آماره F	سطح معناداری
لقی	۲	۰/۰۱۸۶۵	۰/۰۰۹۳۲۴	۲/۵۵	۰/۰۸۸
فیلتر	۱	۰/۰۰۱۳۰	۰/۰۰۱۳۰۱	۰/۳۶	۰/۵۵۴
گشتاور	۴	۰/۸۶۰۶۱	۰/۲۱۵۱۵۱	۵۸/۸	۰/۰۰۰
دور	۲	۰/۴۴۲۷۵	۰/۲۲۱۳۷۷	۶۰/۵	۰/۰۰۰
لقی×فیلتر	۲	۰/۰۳۳۲۰	۰/۰۱۶۵۹۸	۴/۵۴	۰/۰۱۵
لقی×گشتاور	۸	۰/۰۰۵۴۳	۰/۰۰۰۶۷۹	۰/۱۹	۰/۹۹۲
لقی×دور	۴	۰/۰۹۰۱۷	۰/۰۲۲۵۴۲	۶/۱۶	۰/۰۰۰
فیلتر×گشتاور	۴	۰/۰۲۱۹۷	۰/۰۰۵۴۹۳	۱/۵	۰/۲۱۵
فیلتر×دور	۲	۰/۰۲۰۹۲	۰/۰۱۰۴۶۰	۲/۸۶	۰/۰۶۶
گشتاور×دور	۸	۰/۰۸۴۰۷	۰/۰۱۰۵۰۹	۲/۸۷	۰/۰۱۰
خطا	۵۲	۰/۱۹۰۲۸	۰/۰۰۳۶۵۹		
کل	۸۹	۱/۷۶۹۳۵			



شکل ۲- اثر سطوح مختلف متغیرهای مستقل بر کدری دود

بررسی اثر متقابل دور موتور و گشتاور (سطر چهارم ستون دوم شکل ۲)

در همه سطوح دور موتور، گشتاور صفر پایین‌ترین میزان کدری و گشتاور ۱۷۰ بالاترین میزان کدری اتفاق افتاده است. این اتفاق منطبق بر اکثر تحقیقات انجام‌شده است (Poursabagh Roknabadi *et al.*, 2015) که با افزایش دور و گشتاور کدری دود افزایش می‌یابد و همان‌طور که انتظار می‌رود نتایج این مطالعه نشان داد با افزایش دور و گشتاور موتور میزان کدری افزایش می‌یابد.

بررسی اثر فیلتر، لقی سوپاپ، دور و گشتاور موتور بر میزان مصرف سوخت

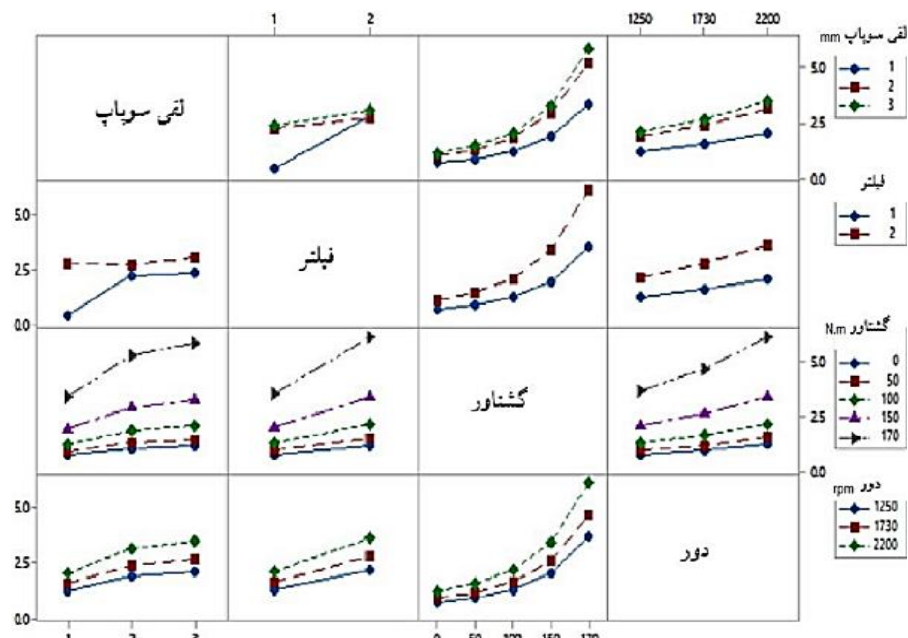
مطابق نتایج حاصله، خطای معیار برآورد ۰/۴۱۵۰۵۱، ضریب تبیین ۹۷/۱۰ درصد، ضریب تبیین تعدیل یافته ۹۵/۰۳ درصد و ضریب تبیین پیش بینی ۹۱/۳۱ به دست آمد. به عبارت دیگر، تقریباً ۹۵ درصد تغییرات مصرف سوخت توسط مدل توجیه شده است.

نتایج تجزیه واریانس (جدول ۷) نشان داد تأثیر متغیرهای مستقل و اثرات متقابل آن‌ها به جز لقی در دور موتور بر پارامتر مصرف سوخت در سطح یک درصد معنی دار است.

با توجه به شکل ۲ می‌توان نتیجه گرفت که پایین‌ترین سطح کدری به ازای لقی سوم و فیلتر یک حاصل می‌شود. در فیلتر تمیز (یک) با توجه به اینکه هوای بیشتری وارد موتور می‌شود و احتراق بهینه‌تری نسبت به حالت فیلتر کثیف ایجاد می‌شود در نتیجه عناصر آلاینده‌گی کمتری ایجاد شده و کدری دود خروجی کاهش می‌یابد. با توجه به اینکه در لقی بیشتر (سه) سوپاپ دود دیرتر باز و زودتر بسته می‌شود و مدت‌زمان کمتری باز است، در نتیجه گازهای سوخته کمتری از موتور وارد آگزوز شده و کدری دود کاهش می‌یابد. در دور موتور ۱۲۵۰ هر سه لقی تقریباً یکسان بوده‌اند، که با نتایج (Abbaszadeh, & Ghobadian, 2008) مطابقت دارد. علت افزایش کدری در لقی کمتر این است که با توجه به اینکه در لقی کمتر سوپاپ دود زودتر باز و دیرتر بسته می‌شود مدت‌زمان بازماندن سوپاپ دود بیشتر بوده در نتیجه گازهای سوخته بیشتری از مجرای دود وارد آگزوز شده و کدری دود خروجی افزایش می‌یابد. افزایش میزان کدری لقی عادی در دور ۲۲۰۰ پیش‌بینی نشده و قابل توجیه نیست.

جدول ۷- تجزیه واریانس برای متغیر مصرف سوخت

منبع تغییر	درجه آزادی	مجموع مربعات تعدیل یافته	میانگین مجموع مربعات تعمیم یافته	آماره F	سطح معناداری
لقی	۲	۲۰/۸۰۸	۱۰/۴۰۴۰	۶۰/۳۹	۰/۰۰۰
فیلتر	۱	۳۱/۴۹۴	۳۱/۴۹۴	۱۸۲/۸۲	۰/۰۰۰
گشتاور	۴	۱۷۹/۶۷۱	۴۴/۹۱۷۹	۲۶۰/۷۵	۰/۰۰۰
دور	۲	۲۰/۲۲۴	۱۰/۱۱۱۸	۵۸/۷۰	۰/۰۰۰
لقی×فیلتر	۲	۱۵/۰۶۶	۷/۵۳۲۹	۴۳/۷۳	۰/۰۰۰
لقی×گشتاور	۸	۹/۱۳۰	۱/۱۴۱۳	۶/۶۳	۰/۰۰۰
لقی×دور	۴	۰/۶۲۳	۰/۱۵۵۷	۰/۹۰	۰/۴۶۹
فیلتر×گشتاور	۴	۱۸/۲۱۳	۳/۳۰۴۶	۱۹/۱۸	۰/۰۰۰
فیلتر×دور	۲	۱/۶۲۳	۰/۸۱۱۴	۴/۷۱	۰/۰۱۳
گشتاور×دور	۸	۷/۸۰۰	۰/۹۷۵۰	۵/۶۶	۰/۰۰۰
خطا	۵۲	۸/۹۵۸	۰/۱۷۲۳		
کل	۸۹	۳۰۸/۶۱۵			



شکل ۳- نمودار اثرات متقابل برای متغیر مصرف سوخت

به عبارت دیگر تقریباً ۹۱ درصد تغییرات متغیر کداری توسط مدل توجیه شده است. با توجه به جدول تجزیه واریانس (جدول ۸) همان‌طور که مشاهده می‌شود عامل لقی اثر معنی‌داری بر دمای خروجی اگزوز ندارد، ولی اثرات اصلی فیلتر، گشتاور و دور موتور در سطح احتمال یک درصد اثر معنی‌داری بر دمای خروجی اگزوز دارند. از اثرات متقابل، اثر لقی در فیلتر و فیلتر در دور موتور به ترتیب در سطح احتمال یک و پنج درصد معنی‌دار هستند.

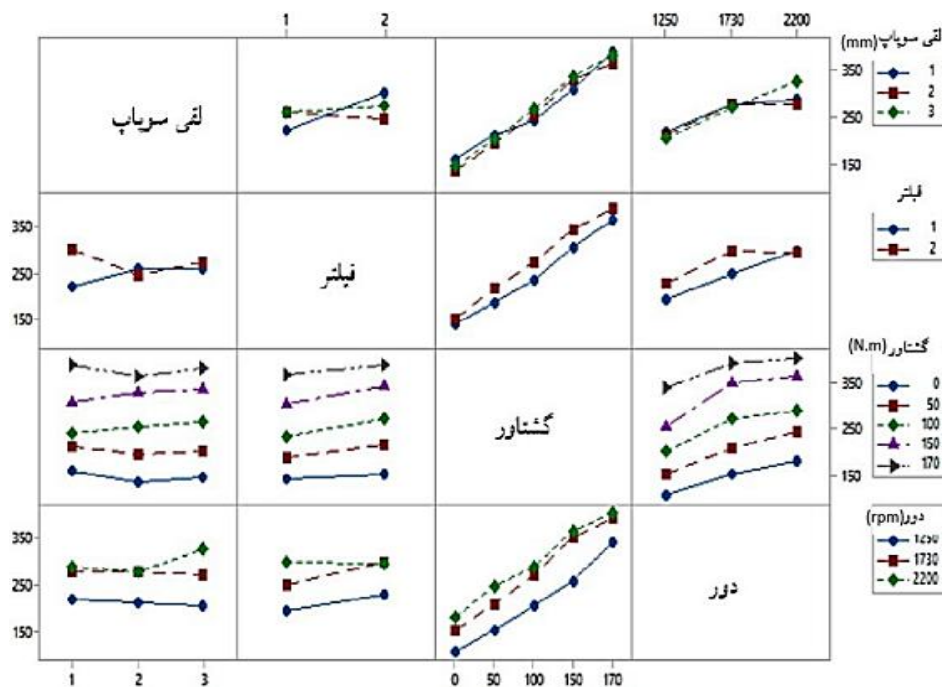
با توجه به نمودار اثرات متقابل (شکل ۳) می‌توان بیان کرد که پایین‌ترین میزان مصرف سوخت به ازای لقی یک و فیلتر یک حاصل شده است. اثر فیلتر تمیز در کاهش مصرف سوخت نیز نشان داده شده است.

بررسی اثر فیلتر، لقی سوپاپ، دور و گشتاور بر دمای خروجی اگزوز

مطابق نتایج حاصله، خطای معیار برآورد ۲۹/۱۱۲۰، ضریب تبیین ۹۵/۰۱ درصد، ضریب تبیین تعدیل یافته ۹۱/۴۶ درصد و ضریب تبیین پیش‌بینی ۸۵/۰۵ به دست آمد.

جدول ۸- تجزیه واریانس برای متغیر دمای موتور

منبع تغییر	درجه آزادی	مجموع مربعات تعدیل یافته	میانگین مجموع مربعات تعمیم یافته	آماره F	سطح معناداری
لقی	۲	۲۲۷۲	۱۱۳۶	۱/۳۴	۰/۲۷۱
فیلتر	۱	۱۷۶۹۶	۱۷۶۹۶	۲۰/۸۸	۰/۰۰۰
گشتاور	۴	۶۲۵۳۸۵	۱۵۶۳۴۶	۱۸۴/۴۸	۰/۰۰۰
دور	۲	۱۱۸۱۴۴	۵۹۰۷۲	۶۹/۷۰	۰/۰۰۰
لقی×فیلتر	۲	۳۶۱۴۷	۱۸۰۷۳	۲۱/۳۳	۰/۰۰۰
لقی×گشتاور	۸	۷۰۸۲	۸۸۵	۱/۰۴	۰/۴۱۶
لقی×دور	۴	۱۲۳۱۲	۳۰۷۸	۳/۶۳	۰/۰۱۱
فیلتر×گشتاور	۴	۲۶۳۱	۶۵۸	۰/۷۸	۰/۵۴۶
فیلتر×دور	۲	۱۰۶۸۳	۵۳۴۱	۶/۳۰	۰/۰۰۴
گشتاور×دور	۸	۶۶۳۹	۸۳۰	۰/۹۸	۰/۴۳۶
خطا	۵۲	۴۴۰۷۱	۸۴۸		
کل	۸۹	۸۸۳۰۶۲			



شکل ۴- نمودار اثرات متقابل برای متغیر دمای خروجی اگزوز

مطابق با نتایج پژوهش‌های منتشر شده (Poursabagh, Roknabadi et al., 2015) همانطور که انتظار می‌رود، با افزایش بار و دور موتور، دمای گازهای خروجی از اگزوز افزایش یافت. در بحث لقی، در لقی بیشتر (سه) چون سوپاپ هوا دیرتر باز و زودتر بسته می‌شود در نتیجه هوای کمتری به داخل موتور راه پیدا می‌کند و منجر به احتراق ناقص سوخت و همچنین افزایش دمای خروجی اگزوز می‌شود و این قضیه در مورد لقی کمتر (دو) به صورت برعکس است. در شرایط لقی کمتر هم‌پوشانی دو سوپاپ

با توجه به نمودار اثرات متقابل (شکل ۴) نتیجه می‌شود که، به ازای لقی یک و فیلتر یک کمترین دمای موتور و به ازای لقی یک و فیلتر دو بیشترین دمای موتور حاصل شده است، بیشترین دمای موتور به ازای لقی ۳ و دور ۲۲۰۰ دور بر دقیقه حاصل شده است، دمای موتور در دور ۱۷۳۰ و ۱۲۵۰ دور بر دقیقه هر سه لقی تقریباً مشابه است. در دور ۱۷۳۰ و ۱۲۵۰ دور بر دقیقه با استفاده از فیلتر یک دمای موتور پایین‌تر بود و در دور ۲۲۰۰ دور بر دقیقه هر دو فیلتر اختلاف معناداری نداشتند.

بررسی اثر فیلتر، لقی، دور و گشتاور بر روی تراز کلی شدت صدای سرسیلندر (L1)

نتایج حاصل از تجزیه واریانس در جدول ۹ نشان می‌دهد که از اثرات اصلی، عوامل لقی و فیلتر بر روی متغیر تراز کلی شدت صدای سرسیلندر (L1) تأثیر معناداری ندارند. ولی متغیرهای گشتاور و دور موتور تأثیر معناداری بر متغیر تراز کلی شدت صدای سرسیلندر (L1) دارند. از اثرات متقابل، تنها اثر لقی در فیلتر در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار است و بقیه اثرات متقابل اثر معنی‌داری ندارند.

باعث شده که دمای خروجی اگزوز افزایش پیدا نکند. در مبحث فیلتر تمیز این قضیه نیز صادق است؛ چون در فیلتر تمیز هوای بیشتری به داخل محفظه احتراق راه پیدا می‌کند، دو حالت پیش می‌آید: یا احتراق بهینه داریم، یعنی بهینه‌تر از حالتی که هوای کمتری برای احتراق کامل وجود دارد و یا احتراق مخلوط فقیر (هوای بیشتر و سوخت کمتر) انجام می‌شود که در هر دو حالت دمای خروجی اگزوز نسبت به حالت مخلوط غنی (سوخت بیشتر و هوای کمتر) کمتر است.

جدول ۹- تجزیه واریانس برای متغیر تراز کلی شدت صدای سرسیلندر (L1)

منبع تغییر	درجه آزادی	مجموع مربعات تعدیل یافته	میانگین مجموع مربعات تعمیم یافته	آماره F	سطح معناداری
لقی	۲	۱۵/۳۴۱	۷/۶۷۰۳	۵/۳۵	۰/۰۰۸
فیلتر	۱	۲/۳۰۲	۲/۳۰۱۹	۱/۶۱	۰/۲۱۱
گشتاور	۴	۵۸/۶۳۱	۲۹/۳۱۵۴	۲۰/۴۶	۰/۰۰۰
دور	۲	۰/۴۴۲۷۵	۰/۲۲۱۳۷۷	۶۰/۵	۰/۰۰۰
لقی×فیلتر	۲	۲۹/۴۱۲	۱۴/۷۰۵۸	۱۰/۲۶	۰/۰۰۰
لقی×گشتاور	۸	۱۳/۹۵۴	۱/۷۴۴۳	۱/۲۲	۰/۳۰۸
لقی×دور	۴	۸/۶۷۰	۲/۱۶۷۴	۱/۵۱	۰/۲۱۲
فیلتر×گشتاور	۴	۲/۸۹۹	۰/۷۲۴۸	۰/۵۱	۰/۷۳۲
فیلتر×دور	۲	۱۵/۶۵۸	۷/۸۲۹۲	۵/۴۶	۰/۰۰۷
گشتاور×دور	۸	۵/۹۸۳	۰/۷۴۷۹	۰/۵۲	۰/۸۳۵
خطا	۵۲	۷۴/۵۰۵	۱/۴۳۲۸		
کل	۸۹	۲۵۷/۰۵۴			

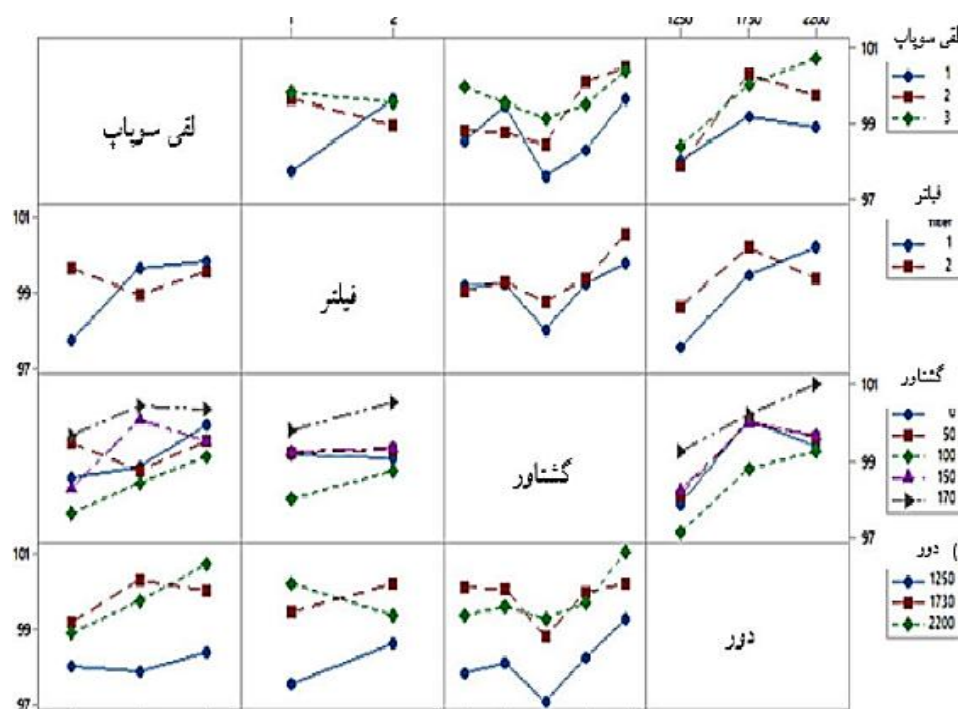
در نتیجه احتراق بهینه‌تری اتفاق می‌افتد و موتور نرم‌تر کار می‌کند و صدای موتور کمتر است. در دور ۱۲۵۰ و ۱۷۳۰ دور بر دقیقه به ازای فیلتر یک و در ۲۲۰۰ دور بر دقیقه به ازای فیلتر دو، کمترین میزان متغیر L1 حاصل شد. هر چند انتظار می‌رود که در هر سه دور موتور فیلتر تمیز صدای کمتری ایجاد کند ولی نتایج این مطالعه نشان داد که در دور ۲۲۰۰ دور بر دقیقه فیلتر شماره دو (کثیف) صدای کمتری تولید می‌کند.

بررسی اثر فیلتر، لقی سوپاپ، دور و گشتاور موتور بر روی تراز کلی شدت صدای بدنه موتور (L2)

نتایج تجزیه واریانس نشان داد از بین عوامل مورد بررسی، اثر دور موتور و اثر متقابل لقی و فیلتر و دور موتور بر پارامتر تراز کلی شدت صدای بدنه موتور معنادار است (جدول ۱۰).

مطابق مدل ارزیابی خطای معیار برآورد ۱/۱۹۶۹۹، ضریب تبیین ۷۱/۰۲ درصد، ضریب تبیین تعدیل یافته ۵۰/۳۹ درصد و ضریب تبیین پیش بینی ۱۳/۱۸ به دست آمد. به عبارت دیگر، تقریباً ۵۰ درصد تغییرات متغیر L1 توسط مدل توجیه شده است.

با توجه به نمودار اثرات متقابل (شکل ۵) می‌توان نتیجه گرفت که، در حالت لقی عادی فیلتر کثیف تراز صدای بالایی دارد. در حالت لقی دوم فیلتر کثیف صدای کمتر تولید می‌کند و برای لقی شماره ۳، نوع فیلتر تأثیری نداشته و میزان صدا تقریباً مشابه است. به این دلیل که در حالت تنظیم بودن لقی (لقی عادی یا لقی یک) به صورت تجربی موتور نرم‌تر کار می‌کند و سروصدای کمتری دارد و همچنین در حالت فیلتر یک (تمیز) میزان مقاومت فشار هوای ورودی به موتور کمتر است، ضمن اینکه در فیلتر تمیز هوای بیشتری برای احتراق به موتور می‌رسد که



شکل ۵- نمودار اثرات متقابل برای متغیر تراز کلی شدت صدای سرسیلندر (L1)

جدول ۱۰- تجزیه واریانس برای متغیر تراز کلی شدت صدای بدنه موتور (L2)

منبع تغییر	درجه آزادی	مجموع مربعات تعدیل یافته	میانگین مجموع مربعات تعمیم یافته	آماره F	سطح معناداری
لقی	۲	۱۰/۷۰۴	۵/۳۵۲۱	۲/۳۲	۰/۱۰۹
فیلتر	۱	۷/۳۲۱	۷/۳۲۰۸	۳/۱۷	۰/۰۸۱
گشتاور	۴	۱۹/۰۷۵	۴/۷۶۸۸	۲/۰۷	۰/۰۹۹
دور	۲	۵۶/۱۶۲	۲۸/۰۸۰۹	۱۲/۱۶	۰/۰۰۰
لقی×فیلتر	۲	۱۹/۱۲۶	۹/۵۶۲۹	۴/۱۴	۰/۰۲۱
لقی×گشتاور	۸	۲۷/۷۵۳	۳/۴۶۹۱	۱/۵۰	۰/۱۷۹
لقی×دور	۴	۱۷/۷۶۷	۴/۴۴۱۹	۱/۹۲	۰/۱۲۰
فیلتر×گشتاور	۴	۳/۰۹۰	۰/۷۷۲۴	۰/۳۳	۰/۸۵۳
فیلتر×دور	۲	۲۵/۸۵۵	۱۲/۹۲۷۳	۵/۶۰	۰/۰۰۶
گشتاور×دور	۸	۸/۷۶۸	۱/۰۹۶۰	۰/۴۷	۰/۸۶۸
خطا	۵۲	۱۲۰/۰۶۵	۲/۳۰۸۹		
کل	۸۹	۳۱۵/۶۵۸			

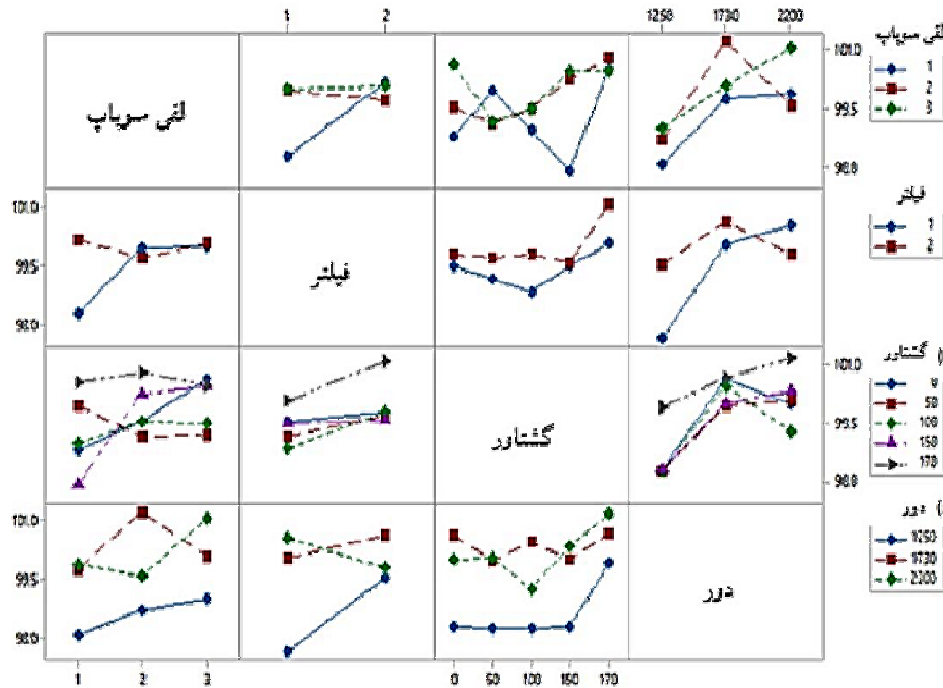
موتور در شرایط لقی عادی و فیلتر تمیز (کاهش مقاومت هوای ورودی به فیلتر و مجرا) نسبت داد. به این دلیل که زمانی که لقی تنظیم باشد (لقی عادی یا لقی یک) به‌طور تجربی موتور در حالت نرم کار می‌کند و همچنین زمانی که فیلتر تمیز باشد هیچ مقاومت فشاری از ناحیه ورود هوا به فیلتر و مجرا ایجاد نمی‌شود. ضمن اینکه به دلیل ورود هوای بیشتر به محفظه احتراق، احتراق بهینه‌تری انجام‌شده و به اصطلاح موتور نرم‌تر کار می‌کند و صدای

مطابق مدل ارزیابی خطای معیار برآورد ۱/۵۱۹۵۲، ضریب تبیین ۶۱/۹۷ درصد، ضریب تبیین تعدیل یافته ۳۴/۹۰ درصد و ضریب تبیین پیش بینی ۰/۰۰۰ به دست آمد. به عبارت دیگر، تقریباً ۳۱ درصد تغییرات تراز کلی شدت صدا در بدنه موتور توسط مدل توجیه شده است.

شکل ۶ نشان می‌دهد که پایین‌ترین میزان متغیر تراز کلی شدت صدای بدنه موتور در شرایط لقی عادی و فیلتر تمیز حاصل می‌شود. این مشاهده را می‌توان به کارکرد مناسب

شدت صدای بدنه موتور شد (شکل ۶). با در نظر گرفتن تأثیر مثبت فیلتر تمیز بر کاهش مقاومت هوای ورودی و در نهایت کاهش تراز شدت صدای بدنه موتور این مشاهده بر خلاف انتظار است.

کمتری ایجاد می‌نماید. نتایج نشان داد در تمام دوره‌های مورد بررسی به جز دور ۲۲۰۰ دور بر دقیقه فیلتر کثیف منجر به افزایش تراز کلی شدت صدای بدنه موتور در دور ۲۲۰۰ دور بر دقیقه فیلتر تمیز سبب افزایش تراز کلی



شکل ۶- نمودار اثرات متقابل برای متغیر تراز کلی شدت صدای بدنه موتور (L2)

افزایش مصرف سوخت می‌توان نتیجه گرفت که لقی سوپاپ تنظیم نیست و یا فیلتر (صافی) هوا کثیف است. البته در فیلتر بیشتر مصرف سوخت از حالت فیلتر کمتر بیش‌تر است. با افزایش میزان تراز کلی فشار صدا در هر دو نقطه نشان از بیشتر بودن لقی سوپاپ است.

نتیجه‌گیری

نتایج حاصل تحقیق نشان داد که تنها گشتاور و دور موتور بر کدوری دود موتور اثر معنی‌داری دارند و دو عامل فیلتر هوا و لقی سوپاپ بر کدوری اثر معنی‌داری ندارند. همچنین همه عوامل اصلی بر میزان مصرف سوخت موتور دیزل اثر معناداری در سطح احتمال یک درصد دارند. نتایج حاصل از بررسی نشان داد که تنها اثر فیلتر، گشتاور و دور بر روی دمای موتور اثر معناداری دارند و عامل لقی سوپاپ اثر معناداری بر دمای موتور ندارد. اثر عوامل گشتاور و دور موتور بر تراز کلی شدت صدای سرسیلندر (L1) تأثیر معناداری دارد و دو متغیر دیگر (لای سوپاپ و فیلتر) اثر معناداری ندارند. نتایج حاصل نشان داد که تنها اثر دور موتور بر تراز کلی شدت صدای بدنه موتور (L2) اثر معناداری دارد و سایر متغیرها اثر معناداری از خود نشان ندادند.

همچنین اگر دمای دود خروجی از گزوز از حالت عادی بالاتر باشد نشان از کثیف بودن صافی (فیلتر) هوا است. با

منابع

- Abbaszadeh, A. & Ghobadian, B. (2008). Investigation of the effect of working parameters of a diesel engine on the amount of exhaust fumes., *Fifth National Congress of Agricultural Machinery and Mechanization Engineering*, Mashhad. (In Persian).
- Akay, A. E., & Acar, H. H. (2019). Using GIS techniques for modeling noise propagation from mechanized harvesting equipment. *European Journal of Forest Engineering*, 5(2): 92-98.
- Albarbar, A., Gu, F., & Ball, A. D. (2010). Diesel engine fuel injection monitoring using acoustic measurements and

- and programming guidance (Master's thesis, NTNU).
- Nemat Keramat, S., Gholam, H., Najafi, S.R., Beigi, H., & Ghobadian, B. (2017). *Frequency analysis of the effect of a mixture of diesel and biodiesel fuels on the sound of a single-cylinder diesel engine*, Sound and vibration, 13-22.
- Poursabagh Roknabadi, H., Rouhani, A., Tabasizadeh, M., & Naderan Tahan, H., (2015). Regression evaluation of smoke outlet temperature according to the parameters of internal combustion engine load and load., *6th Iranian Fuel and Combustion Conference*, Mashhad. (In Persian).
- Pruvost, L., Leclerc, Q., & Parizet, E. (2009). Diesel engine combustion and mechanical noise separation using an improved spectrofilter. *Mechanical systems and signal processing*, 23(7): 2072-2087.
- Rakopoulos, C. D., Dimaratos, A. M., Giakoumis, E. G., & Rakopoulos, D. C. (2011). Study of turbocharged diesel engine operation. pollutant emissions and combustion noise radiation during starting with bio-diesel or n-butanol diesel fuel blends. *Applied Energy*, 88(11): 3905-3916.
- Shahlari, A. J., Kurtz, E., Hocking, C., & Antonov, S. (2015). Correlation of cylinder pressure-based engine noise metrics to measured microphone data. *International Journal of Engine Research*, 16(7): 829-850.
- Tabatabaei Kolor, R., Khosravi, M., & Mousavi, R. (2018). Evaluation of vibration and sound exposure produced by an orchard roto-tiller. *Iranian Journal of Biosystems Engineering*, 49(1): 139-148.
- Wu, J. D., Chiang, P. H., Chang, Y. W., & Shiao, Y. J. (2008). An expert system for fault diagnosis in internal combustion engines using probability neural network. *Expert Systems with Applications*, 34(4): 2704-2713.
- Zhou, Y., Liang, Y., & Li, R. (2019). Research on intelligent diagnosis technology of emergency diesel generator in nuclear power plant based on new monitoring method. *In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, IOP Publishing, 677(3): 032074.
- independent component analysis. *Measurement*, 43(10): 1376-1386.
- Anvarinia, A., Matbooi, A., & Dastbast, M., (2015). The effect of air filter replacement on engine parameters and the amount of exhaust fumes., *the second international conference and the third national conference on the application of new technologies in engineering sciences*, Mashhad., (In Persian).
- Anyu, C., Jide, J., Xiliang, D., & Zhongkui, Z. (2011, January). Transient sound visualization and application to analysis of engine acoustic characteristics by continuous wavelet transform. *In 2011 Third International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation*, IEEE, 3: 1048-1051.
- Cai, M., Lan, Z., Zhang, Z., & Wang, H. (2019). Evaluation of road traffic noise exposure based on high-resolution population distribution and grid-level noise data. *Building and Environment*, 147: 211-220.
- Das, R. R., Kakkad, S., & Kumar, E. V. (2019). Diesel Engine Control and Protection Monitoring using PID Controller. In 2019 Innovations in Power and Advanced Computing Technologies (i-PACT) (Vol. 1, pp. 1-6). IEEE.
- Giakoumis, E. G., Dimaratos, A. M., & Rakopoulos, C. D. (2011). Experimental study of combustion noise radiation during transient turbocharged diesel engine operation. *Energy*, 36(8): 4983-4995.
- Guangpu, L., Shihua, B., & Hongxia, P. (2006). Analysis of noise characteristics for diesel engine. *In 2006 IEEE International Conference on Information Acquisition*, IEEE, pp. 1390-1394.
- Hassan-Beygi, S. R., & Ghobadian, B. (2005). Noise attenuation characteristics of different road surfaces during power tiller transport. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*.
- Jafari, M., Behzad, M., & Mehdigoli, H. (2009). Application of Acoustic Emission among different methods of monitoring and troubleshooting internal combustion engines., *Fourth Specialized Conference on Status Monitoring and Troubleshooting, Tehran*. (In Persian) .
- John, J. A. & Williams. E. R. (2013). *Cyclic and Computer-Generated Designs*. 2nd ed, London.
- JunHong, Z., & Bing, H. (2005). Analysis of engine front noise using sound intensity techniques. *Mechanical systems and signal processing*, 19(1): 213-221.
- Lærum, K. H. (2018). *A study of machine learning for predictive maintenance-a topic*