

Investigating the effect of biodiesel on diesel engine corrosion and durability with an environmental assessment: Modeling the impact on water resources with machine learning

Ramin Meshkabadi ¹, Sina Ardabili ², Aziz Babapoor ³, Mohammad Ahmadi ⁴, Alireza Tolouei ⁵

¹ Associate professor, Department of Engineering Sciences, Faculty of Advanced Technologies, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran.

² Assistant professor, Department of Engineering Sciences, Faculty of Advanced Technologies, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran.

³ Professor, Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran.

⁴ Associate professor, Department of Science and Wood and Paper, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran.

⁵ PhD student, Department of Science and Wood and Paper industries, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran.

Extended Abstract

Introduction

Because of the increasing trend towards the adoption of biodiesel, veritable renewable alternative to fossil fuel, for purposes of transport, accelerated research has been initiated on the performance and durability of the engine. One major challenge identified is that biodiesel is corrosive while in contact with metallic surfaces of diesel engines. Studies have indicated that biodiesel induces faster corrosion rates in metals like copper, brass, and carbon steel associated with fuel systems and engine components. Corrosive behavior of biodiesel, derived from its higher porosity, electrical conductivity, and presence of organic acids, forming when subjected to oxidation processes, are some of the factors that induce corrosion of parts in the engine which, in turn, are likely to stimulate higher maintenance costs and reduced life of engines at the end. Biodiesel corrosion and engine endurance can be assessed using this study as a pioneering attempt to understand how biodiesel interacts with all metal components in diesel engines and its environmental effects on water pollution using advanced modeling techniques. The thorough investigation of multiple metal types regarding biodiesel combustion presents an exhaustive life-cycle assessment their staged influence of these metals on water pollution. Such a multidisciplinary investigative activity advances materials degradation understanding and pushes the development of enduring engine components that can negotiate the peculiarities of biofuels within their operating environments. Additionally, Machine-learning models are among the most significant advances toward predicting corrosion performance from different biodiesel compositions and environmental conditions.

Materials and Methods

The steps of this research were carried out in four steps. In the first step, biodiesel was produced through the transesterification process of waste cooking oil in the presence of 1.1% by weight of sodium hydroxide (as a catalyst) and methanol with an alcohol to oil ratio of 6:1 and a mixing intensity of 710 rpm. The production temperature was kept constant in the range of the boiling point of methanol. Then, test fuel samples labeled B0 (pure diesel as a control fuel), B2 (diesel fuel containing two percent biodiesel), B5 (diesel fuel containing five percent biodiesel), and B10 (diesel fuel containing ten percent biodiesel) were prepared with a volume of one liter. Next, the engine test was performed using a single-cylinder diesel engine. Next, engine oil sampling was carried out in volumes of 150 ml at working intervals of 48, 96, and 144 hours. Atomic absorption spectroscopy was used to atomize metal elements in the presence of an oxyacetylene flame. In this process, the digested solution is converted into free atoms containing vapor. Using the calibration and extrapolation method, the obtained absorption value is used to determine the element concentration in the presence of control solutions. In the next step, the life-cycle assessment began with the preparation of a life cycle inventory focusing on the inputs related to fuel sample preparation and its effects on the corrosion rate in a diesel engine based on engine operating hours. The IMPACT2002+ method was used to perform the production inventory assessment. The next step included modeling and determining the effective parameter using the support-vector-machine method (a method of machine learning). In this step, 60/40 of the data was used as data for the model training stage and test stage, respectively. The root RMSE and R^2 were used to evaluate the model.

Results and Discussion

Results showed that increased biodiesel concentration has a pronounced effect on the indicators, with B10 being the highest level considered for acidification and eutrophication, due to increased nitrogen oxides stemming from biodiesel combustion. It thus calls for optimizing combustion processes coupled to nitrogen oxide emission reductions in order to mitigate adverse ecological impacts. Coupled with this, there was also a support-vector-machine (SVM) modeling approach to predict these water quality parameters, which showed high accuracy and reliability in being modeled. Sensitivity analysis determined relevant independent variables. The analysis was performed on six independent parameters and showed that they affected much of the environment-related indicators to water resources. The critical factor, biodiesel percentage in fuel, emerged as a significant factor affecting all the indicators for environment impact (percentage-based: 0.55 for eutrophication, 0.81 for acidification, and 0.76 for ecotoxicity). Such a trend indicated that changes in biodiesel content would play an important role in incurring-reducing or increasing impacts on the environment. Engine operational hours had a relatively low impact on eutrophication (0.45) and acidification (0.61) with an even smaller impact on ecotoxicity (0.38).

Conclusion

This operation period extremely matters because, from the analysis of the engine oils, it says that the amount of metal will be highly influenced by operation time. This was further brought about by oxidation or corrosion over time on the aluminium, chromium, copper, and iron content in this trend of attempting to use a higher percentage of biodiesel to achieve a significant increase in welding and corrosion affecting engine parts. Besides these two, acidification and also eutrophication of water resources have also been worsened by the use of biofuels, more specifically B10. Excess nitrogen oxides emitted through burning biodiesel act as nutrients and favor algal blooms, that ultimately acidify waters and could eventually be destructive to aquatic ecosystems. Hence nitrogen oxide emissions shall be strictly controlled, and one must install after-treatment systems for catalytic mitigation of this kind of fuels on the adverse effects the environment has to face with such fuels.

Keywords: Biodiesel, Water Resources, Modeling, Machine Learning, Artificial Intelligence, Life Cycle Assessment

Article Type: Research Article

Acknowledgement

In this section, we would like to thank and appreciate the cooperation and assistance of the University ... in supporting the laboratory stages and advancing this research.

Conflicts of interest

The authors of this article declared no conflict of interest regarding the authorship or publication of this article.

Data Availability Statement:

We have no permission to release data and codes.

Authors' contribution

Ramin Meshkabadi: Conceptualization, Supervision, Methodology; **Sina Ardabili:** Software, Writing-original draft preparation, Formal analysis and investigation; **Aziz Babapoor:** Revision, Supervision; **Mohammad Ahmadi:** Manuscript editing, Resources; **Alireza Tolouei:** Visualization.

*Corresponding Author, E-mail: r_meshkabadi@uma.ac.ir; sina.faiz@uma.ac.ir

Citation: Meshkabadi, R., Ardabili, S., Babapoor, A., Ahmadi, M., & Tolouei, A. (2025). Investigating the effect of biodiesel on diesel engine corrosion and durability with an environmental assessment: Modeling the impact on water resources with machine learning. *Water and Soil Management and Modelling*, 5(2), 88-106.
doi: 10.22098/mmws.2025.16378.1526

Received: 15 December 2024, Received in revised form: 19 April 2025, Accepted: 20 April 2025, Published online: 22 June 2025

Water and Soil Management and Modeling, Year 2025, Vol. 5, No. 2, pp. 88-106

Publisher: University of Mohaghegh Ardabili

© Author(s)





بررسی تأثیر بیودیزل در خوردگی و دوام موتور دیزل با بیان ارزیابی محیط زیستی: مدل سازی تأثیر بر منابع آبی با یادگیری ماشین

رامین مشک آبادی^{۱*}، سینا اردبیلی^{۲*}، عزیز باباپور^۳، محمد احمدی^۴، علیرضا طلوعی^۵

^۱ دانشیار، گروه مهندسی نوین، دانشکده فناوری های نوین، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران.

^۲ استادیار، گروه مهندسی نوین، دانشکده فناوری های نوین، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران.

^۳ استاد، گروه مهندسی شیمی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه محقق اردبیلی، ایران.

^۴ دانشیار، گروه صنایع چوب و کاغذ، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، ایران.

^۵ دانشجوی دکتری، گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران.

چکیده

این تحقیق به بررسی تأثیر بیودیزل در خوردگی و دوام موتور دیزل از نقطه نظر ارزیابی محیط زیستی با رویکرد تأثیر بر روی منابع آبی و ارائه مدلی برای استخراج پارامترهای تأثیرگذار پرداخت. در این مطالعه اثرات محیط زیستی منابع آبی با تمرکز بر سه شاخص حیاتی (شامل یوتریفیکاسیون، اسیدی شدن و سمیت محیط زیستی) بررسی شد. برای انجام این تحلیل از روش ارزیابی چرخه حیات با روش ارزیابی IMPACT2002+ استفاده شد. خواص فیزیکی و شیمیایی سوخت مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت، که نشان می دهد که درصد بیودیزل بیش تر منجر به افزایش چگالی و ویسکوزیته می شود که به نوبه خود بر عملکرد موتور و انتشار گازهای گلخانه ای تأثیر می گذارد. مطابق با نتایج به دست آمده، این مطالعه نشان می دهد که افزایش محتوای بیودیزل در سوخت به طور قابل توجهی بر این شاخص ها تأثیر می گذارد، به ویژه با سوخت دیزل حاوی ده درصد بیودیزل (B10) که بالاترین پتانسیل اسیدی شدن و یوتریفیکاسیون (پرغذایی) را به دلیل افزایش انتشار اکسید نیتروژن از احتراق بیودیزل نشان می دهد. این یافته ها بر ضرورت بهینه سازی فرآیندهای احتراق و مدیریت انتشار اکسید نیتروژن برای کاهش اثرات نامطلوب اکولوژیکی تأکید می کند. علاوه بر این، یک رویکرد مدل سازی ماشین بردار پشتیبان (SVM) برای پیش بینی پارامترهای کیفیت آب، و دستیابی به دقت و قابلیت اطمینان بالا در مدل سازی استفاده شد. تجزیه و تحلیل حساسیت، متغیرهای مستقل کلیدی را شناسایی کرد که بر نتایج محیط زیستی تأثیر می گذارند، و اهمیت درصد بیودیزل و فرآیند تولید این سوخت در کاهش اثرات محیط زیستی بر منابع آبی را برجسته می کند. این مطالعه بر نیاز به مدیریت دقیق و نظارت بر استفاده از بیودیزل برای افزایش پایداری و به حداقل رساندن آسیب های محیط زیستی به خصوص در سلامت منابع آبی تأکید می کند.

واژه های کلیدی: بیودیزل، منابع آبی، مدل سازی، یادگیری ماشین، هوش مصنوعی، ارزیابی چرخه حیات

نوع مقاله: پژوهشی

*مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: r_meshkabadi@uma.ac.ir; sina.faiz@uma.ac.ir

استناد: مشک آبادی، رامین، اردبیلی، سینا، باباپور، عزیز، احمدی، محمد، و طلوعی، علیرضا (۱۴۰۴). بررسی تأثیر بیودیزل در خوردگی و دوام موتور دیزل با بیان ارزیابی محیط زیستی: مدل سازی تأثیر بر منابع آبی با یادگیری ماشین. *مدل سازی و مدیریت آب و خاک*، ۵ (۲)، ۸۸-۱۰۶.

doi: 10.22098/mmws.2025.16378.1526

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۹/۲۵، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۱/۳۰، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۱/۳۱، تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۴/۰۱



مدل سازی و مدیریت آب و خاک، سال ۱۴۰۴، دوره ۵، شماره ۲، صفحه ۸۸ تا ۱۰۶.

© نویسندگان

ناشر: دانشگاه محقق اردبیلی

۱- مقدمه

پذیرش روزافزون سوخت‌های زیستی، به‌ویژه بیودیزل، به‌عنوان یک جایگزین پایدار برای سوخت‌های فسیلی در حمل و نقل، نگرانی‌های قابل توجهی را در مورد عملکرد و دوام موتور ایجاد کرده است. یکی از مسائل مهم، ماهیت خورنده بیودیزل در تماس با اجزای فلزی مختلف در موتورهای دیزلی است (Nguyen and Vu, 2019). مطالعات نشان می‌دهد که بیودیزل می‌تواند منجر به سرعت بخشیدن به ماهیت خوردگی در فلزاتی مانند مس، برنج و فولاد کربنی شود که معمولاً در سیستم‌های سوخت‌رسانی موتور و اجزای آن استفاده می‌شوند (Bhardwaj et al., 2014). رفتار خورنده بیودیزل به محتوای اکسیژن بالاتر، هدایت الکتریکی و حضور اسیدهای آلی تشکیل شده در طی فرآیندهای اکسیداسیون نسبت داده می‌شود (Hoang et al., 2020; Hosseinabadi et al., 2022). این عوامل به ایجاد خوردگی در اجزای موتور کمک می‌کنند و به‌طور بالقوه منجر به افزایش هزینه‌های نگهداری و کاهش طول عمر موتور می‌شود (Hosseinabadi et al., 2022). بر این اساس، تولید و به‌کارگیری بیودیزل در مقیاس بزرگ می‌تواند به‌طور قابل توجهی منجر به انتشار آلاینده‌های مختلف به‌خصوص فلزات موجود در ساختار موتور (به‌عنوان آلاینده‌های اصلی منابع آب و خاک) شود و به دنبال آن بر منابع آب تأثیر بگذارد که ارزیابی کمیت و پیامدهای کیفیت آب را ضروری می‌کند. به‌طوری‌که فلاحی اردکانی در مطالعه‌ای انتشارات حاصل از عملکرد خودروها، از جمله احتراق، و خوردگی در قطعات موتور را، عامل مهمی در نشر فلزات سنگین در محیط زیست معرفی کرده است (Falahi-Ardakani, 1984). (Leitao, 2007) در مطالعه‌ای ترافیک جاده‌ای و انتشارات مربوط به فلزات سنگین ناشی از خوردگی موتور را به منبعی برای آلودگی آب‌های زیرزمینی و خاک شناسایی کرد. (Warmate et al., 2011) دفع نادرست روغن موتور استفاده شده را به‌عنوان عاملی در آلودگی خاک و آب با فلزات سنگین معرفی کرده است. این در حالی است که علت اصلی آلودگی روغن موتور به فلزات سنگین اثرات خوردگی احتراق سوخت در اجزای داخلی موتور می‌باشد و از آنجایی که روغن موتور خاصیت تمیزکاری اجزای موتور را دارد، بر این اساس به این فلزات آلوده می‌شود.

همان‌طور که مشخص است مطالعات در این زمینه تحقیقاتی محدود می‌باشد. به‌طوری‌که برای تصمیم درست و متقن در این زمینه علمی نیاز به ارزیابی‌های بیش‌تر می‌باشد. در این حوزه ارزیابی‌های محیط زیستی به‌عنوان اصلی‌ترین روش‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند. یکی از این ابزارها، ارزیابی چرخه حیات می‌باشد که می‌تواند اطلاعات جامعی در خصوص ارزیابی سیاهه

تولید و به‌کارگیری بیودیزل، اثرات آن در خوردگی اجزای داخلی موتور و به طبع آن تأثیر در منابع آبی ارائه دهد. بخش اعظمی از مطالعات انجام شده در بررسی تأثیر بیودیزل از نقطه نظر محیط زیستی در موتور دیزل، فقط اثرات بیودیزل و افزودنی‌های آن را در عملکرد و آلاینده‌گی موتور دیزل می‌باشد و آلاینده اصلی که خوردگی موتور می‌باشد نادیده گرفته شده است. در مطالعه Xing et al. (2010)، ارزیابی چرخه حیات نشان داد که تولید و استفاده از بیودیزل می‌تواند منجر به انتشار آلاینده‌های خاص در مقایسه با دیزل فسیلی شود که نیاز به ارزیابی‌های محیط زیستی دارد. (Müller, 2012) مصرف آب و تأثیر آن بر منابع آب را در چرخه حیات تولید بیودیزل سویا در برزیل با استفاده از ارزیابی ردپای آب و چرخه حیات ارزیابی کردند. (Rajaeifar et al., 2019) ارزیابی چرخه حیات ثابت کردند این روش می‌تواند اطلاعات جامعی در مورد اثرات محیط زیستی تولید و استفاده از بیودیزل، از جمله اثرات بر منابع آب ارائه دهد. (Anthony et al., 2021) مروری بر ارزیابی چرخه حیات تولید بیودیزل و اثرات محیط زیستی آن در مقیاس تولید بیودیزل ارائه کردند. (Yeşilyurt et al., 2019) دریافتند بیودیزل به‌دلیل وجود آب و اسیدهای چرب آزاد، خورنده‌تر از سوخت دیزل می‌باشد که باعث کاهش عمر اجزای موتور و بدتر شدن خواص سوخت می‌شود. اما مطالعه‌ای که بتواند به‌طور جامع اثرات محیط زیستی این افزایش خوردگی را مورد بررسی قرار دهد، یافت نشد. از طرفی دیگر در سال‌های اخیر پژوهشگران از روش‌های یادگیری ماشینی و یادگیری عمیق برای مدل‌سازی و بهینه‌سازی فرایندهای مختلف و بررسی اثرات محیط زیستی آن استفاده کرده‌اند (Ardabili et al., 2019). این روش‌های محاسباتی پیشرفته عملکرد و دقت بالاتری را در مدل‌سازی و یافتن نقاط تأثیرگذار و ارائه پیش‌بینی دقیق از عملکرد سیستم ارائه می‌دهند (Ardabili et al., 2019). همان‌طور که صنعت سوخت زیستی رشد می‌کند، درک و کاهش اثرات آن بر دوام موتور از طریق کاهش اثر خوردگی فلزات مختلف و تأثیر این اثر بر انتشارات موتور و ارتباط آن با منابع آب برای توسعه سیاست‌های انرژی پایدار بسیار مهم خواهد بود.

این مطالعه را می‌توان به‌عنوان یکی از مطالعات در بررسی تأثیر بیودیزل بر خوردگی و دوام موتور در درک جامع نحوه تعامل بیودیزل با اجزای فلزی مختلف در موتورهای دیزل و اثرات محیط زیستی آن در آلودگی منابع آبی همراه با روش‌های مدل‌سازی پیشرفته دانست. این تحقیق با بررسی انواع فلزات متعدد در طول فرایند احتراق بیودیزل، به ارائه دیدگاهی جامع از نقطه نظر ارزیابی چرخه حیات و تأثیر این فلزات بر آلودگی منابع آبی می‌پردازد. این رویکرد چند وجهی نه تنها درک تخریب مواد را افزایش می‌دهد،

رویکردی ارائه نکرده‌اند. هدف این مطالعه ارائه یک رویکرد جدید در ترویج منابع انرژی پایدار با اشاره به اثرات بالفعل بیودیزل در آلودگی منابع آبی و چاره اندیشی برای این چالش می‌باشد که تاکنون در مطالعات مربوطه بررسی نشده اند.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- تولید بیودیزل و آماده‌سازی نمونه سوخت‌ها

بیودیزل از طریق فرآیند ترانس استریفیکاسیون ضایعات روغن پخت و پز در حضور ۱/۱ درصد وزنی هیدروکسید سدیم (به‌عنوان کاتالیزور) و متانول با نسبت الکل به روغن شش به یک و شدت اختلاط ۷۱۰ دور در دقیقه تولید شد. دمای تولید در محدوده نقطه جوش متانول ثابت نگه داشته شد. این شرایط توسط Faizollahzadeh (2018) و Aardabili et al. (2018) به‌عنوان شرایط بهینه برای دستیابی به حداکثر راندمان تولید بیودیزل گزارش شده است. خواص ترموفیزیکی بیودیزل، از جمله چگالی، ویسکوزیته، ارزش حرارتی و نقطه اشتعال، بر اساس دستورالعمل‌های استاندارد ASTM اندازه‌گیری شد. جدول ۱ استانداردها و محدوده‌های اندازه‌گیری را برای هر عامل نشان می‌دهد.

بلکه توسعه اجزای موتور بادوام‌تر را که می‌توانند در برابر چالش‌های منحصربه‌فرد ناشی از سوخت‌های زیستی مقاومت کنند، را تشویق می‌کند. همچنین، ادغام مدل‌های یادگیری ماشین نشان دهنده پیشرفت قابل توجهی در پیش‌بینی رفتار خوردگی بر اساس ترکیبات مختلف بیودیزل و شرایط محیطی است. روش‌های سنتی برای ارزیابی خوردگی اغلب بر داده‌های تجربی یا تست‌های غوطه‌وری استاتیک تکیه می‌کنند، که می‌تواند زمان‌بر باشد و ممکن است ماهیت دینامیکی عملکرد موتور در دنیای واقعی را نشان ندهد. با استفاده از روش‌های یادگیری ماشین، این تحقیق می‌تواند مجموعه داده‌های بزرگ را برای شناسایی الگوها و همبستگی‌هایی که به انتخاب مواد و فرمول‌بندی سوخت بهتر اطلاع می‌دهند، تجزیه و تحلیل کند. مؤلفه ارزیابی محیط زیستی این تحقیق همچنین با پیوند دوام موتور با اثرات محیط زیستی گسترده‌تر، دیدگاه جدیدی را معرفی می‌کند. با افزایش مصرف بیودیزل، درک اثرات آن بر منابع آب و آلودگی بالقوه آن ضروری می‌شود. در حالی که مطالعات قبلی قابلیت خوردگی بیودیزل نسبت به سوخت دیزل را شناسایی کرده‌اند، اما هیچ‌کدام در مورد اثرات بالفعل این خوردگی در آلودگی منابع اصلی (مانند منابع آبی) از طریق یک بررسی جامع،

جدول ۱- محدوده استاندارد خواص بیودیزل و سوخت‌های پایه

Table 1- Standard range of biodiesel and base fuels properties

خاصیت	ویسکوزیته	دانسیته	ارزش حرارتی	نقطه اشتعال
شماره استاندارد	ASTM D445	ASTM 6751-02	ASTM D240	ASTM D93
محدوده استاندارد	1.9-6	0.87-0.90	35-39.9	>130
واحد	mm ² /s	g/cm ³	MJ/kg	°C
سوخت دیزل	2.9	0.86	45.8	89
بیودیزل	4.7	0.89	37.5	135

تثبیت نمونه‌های سوخت در دمای اتاق به مدت ۱۵ دقیقه استفاده شد. از سوخت دیزل به‌عنوان کنترل استفاده شد. جدول ۲ جزئیات آماده‌سازی نمونه سوخت برای ۱۰۰۰ میلی لیتر را نشان می‌دهد.

در این مطالعه سوخت‌های B2 (۲ درصد بیودیزل و ۹۸ درصد دیزل)، B5 (۵ درصد بیودیزل و ۹۵ درصد دیزل) و B10 (۱۰ درصد بیودیزل و ۹۰ درصد دیزل) تهیه شدند. یک هموژنایزر برای

جدول ۲- ترکیبات نمونه سوخت

Table 2- Fuel Sample compositions

ردیف	کد	بیودیزل	دیزل
1	B0	0	1000
2	B2	20	980
3	B5	50	950
4	B10	100	900

تست‌ها در ۱۵۰۰ دور در دقیقه و بار کامل (۱۰۰ درصد) انجام شد. بر اساس مطالعه Najafi et al. (2018)، یک موتور دیزل می‌تواند بالاترین راندمان را در بار نزدیک به بار کامل نشان دهد. بر این اساس، در این مطالعه، یک موتور دیزل تحت بار کامل

این موتور یک موتور دیزلی تک سیلندر، تنفس طبیعی و تزریق مستقیم با سرعت ثابت (۱۵۰۰ دور در دقیقه) بود (جدول ۳ مشخصات موتور را نشان می‌دهد). موتور مورد نظر به یک ژنراتور الکتریکی (دینامومتر جریان گردابی) متصل شد. تمامی

ژنراتور برای انجام تست موتور راه‌اندازی شد. بار موتور با استفاده از یک دستگاه بارگذاری مقاومت متغیر (TDGC2-5KVA) متصل به یک ژنراتور الکتریکی متصل به موتور هدف اعمال شد.

ژنراتور دارای یک لودسل ۲۰۰ کیلونیوتن از طریق بازویی به طول ۳۰ سانتی‌متر بود. برای اندازه‌گیری بار اعمال شده از نیروی سنج Lutron FG-5100 استفاده شد.

جدول ۳. مشخصات موتور دیزل دوگانه سوز

Table 3. The specifications of the dual-fuel diesel engine

مشخصات	پارامترهای موتور
Kirloskar Oil Engines Ltd., India	مدل
1	تعداد سیلندر
4 Stroke, Direct injection, naturally aspirated	نوع موتور
Air cooling	سیستم خنک کاری
17.5	ضریب تراکم
0.94	حجم جابجایی
7.4 kW@ 1500 rpm	حداکثر توان (کیلووات)

آزمایش‌ها با نمونه‌های مختلف سوخت و گازوئیل به‌عنوان سوخت کنترل انجام شد. با توجه به تغییر ارزش حرارتی نمونه‌های سوخت، پس از تعویض نمونه‌های سوخت، دور موتور در دور ثابت ۱۵۰۰ دور در دقیقه (سرعتی که ژنراتور حداکثر توان خود را تولید می‌کند) تنظیم شد. در این مطالعه، روش تست موتور طبق مطالعه Kurre et al. (2015) بود. بر این اساس موتور راه‌اندازی شد و به شرایط تست رسید. مدت زمان کار موتور در سه سناریوی اصلی شامل ۴۸، ۹۶، و ۱۴۴ ساعت بود. پس از این مدت، نمونه برداری روغن انجام شد.

۲-۲- آنالیز نمونه‌های روغن موتور

این مطالعه نمونه برداری روغن موتور را با استفاده از روش انجام شده توسط Kurre et al. (2015) انجام داد. روغن موتور مورد استفاده SAE20W-40 بود. این روش نمونه‌ها را در حجم‌های ۱۵۰ میلی‌لیتری در فواصل کاری ۴۸، ۹۶، و ۱۴۴ ساعت جمع‌آوری کرد.

در این مطالعه از طیف سنجی جذب اتمی برای ذره‌ای کردن عناصر فلزی در حضور شعله اکسی استیلن استفاده شد. در این فرآیند محلول هضم شده به اتم‌های آزاد حاوی بخار تبدیل می‌شود. با استفاده از روش کالیبراسیون و برون‌یابی، مقدار جذب به‌دست آمده برای تعیین غلظت عنصر در حضور محلول‌های کنترل استفاده می‌شود. این روش از روش ارائه شده توسط Kurre et al. (2015) پیروی کرد.

خوردگی موتور در حضور نمونه‌های مختلف سوخت با اندازه‌گیری محتوای آلومینیوم، آهن، مس و کروم طبق مطالعه Kurre et al. (2015) ارزیابی شد. آلومینیوم به قطعات سخت‌افزاری پیستون، آهن به آستر سیلندر، سوپاپ‌ها، شفت و میل بادامک، مس به یاتاقان‌ها و کروم به رینگ‌های پیستون

مربوط می‌شد. Pandey and Kurre et al. (2015) و Nandgaonkar (2011) منابع اصلی سایش فلز گزارش کردند. از آنجایی که این مطالعه عمدتاً بر انجام تست خوردگی موتور متمرکز بود، این منابع خوردگی را نیز با استفاده از طیف‌سنجی جذب اتمی اندازه‌گیری کرد (Kurre et al., 2015). با افزودن دو گرم H_2SO_4 به دو گرم از هر یک از نمونه‌های روغن، آنها را به آون منتقل و سپس خشک کردند (در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد). سپس نمونه‌های خشک شده به آون منتقل و در دمای ۵۵۰ تا ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد به خاکستر تبدیل شدند. پس از تهیه خاکستر، محلول مورد نظر با افزودن اسید کلریدریک و آب مقطر تهیه شد. چهار استاندارد با غلظت‌های شناخته شده تا ۵ ppm برای هر فلز برای نمونه کنترل و کالیبراسیون تهیه شد.

۳-۲- ارزیابی چرخه حیات

ارزیابی چرخه حیات برای ارزیابی اثرات بالقوه محیطی و منابع یک محصول، فرآیند یا خدمات در طول عمر آن استفاده می‌شود (Hashemi, 2021). با استفاده از روش ارزیابی چرخه حیات، اثرات محیط زیستی در هر مرحله از چرخه حیات گهواره تا دروازه، از تولید مواد خام، از جمله هرگونه تولید مرتبط، حمل و نقل، استفاده کاربر و دفع، به‌طور کامل تجزیه و تحلیل می‌شود (Hashemi-Nejhad et al., 2023; Hashemi et al., 2023). ارزیابی چرخه حیات در چهار مرحله انجام می‌شود. شرح هدف و محدوده، تجزیه و تحلیل موجودی، ارزیابی تأثیر و تفسیر چرخه حیات. در این مطالعه یک سیاهه چرخه حیات با تمرکز بر ورودی‌های مربوط به آماده‌سازی نمونه سوخت و اثرات آن بر نرخ خوردگی در یک موتور دیزل بر اساس ساعات کار موتور مورد نیاز است. جدول ۴ موجودی چرخه حیات را نشان می‌دهد. در این

مطالعه، واحد عملکردی نهایی، تولید ۱ کیلووات توان تولید شده از احتراق هر نمونه سوخت است.

جدول ۴- سیاهه آماده‌سازی نمونه سوخت و رفتار خوردگی

Table 4. Inventory of fuel sample preparation and corrosion behavior

آیتم	مقدار	واحد
تولید بیودیزل (تابع عملکردی معادل ۱ لیتر بیودیزل)		
متانول	0.14	kg
آب	2.8	kg
استیل	0.0014	kg
الکتریسیته	0.44	kWh
HCL	0.003	kg
NaOH	0.011	kg
آماده‌سازی نمونه سوخت (تابع عملکردی معادل ۱ لیتر سوخت)		
بیودیزل	مطابق با جدول ۲	kg
دیزل	مطابق با جدول ۲	kg
پلاستیک	0.0021	kg
استیل	0.00019	kg
الکتریسیته	0.45	kWh
خوردگی موتور (تابع عملکردی معادل ۱ کیلووات ساعت توان ترمزی موتور)		
آلومینیوم	مطابق با سناریو مربوطه	ppm
کروم	مطابق با سناریو مربوطه	ppm
مس	مطابق با سناریو مربوطه	ppm
آهن	مطابق با سناریو مربوطه	ppm

بردارهای پشتیبانی شناخته می‌شود. با تمرکز بر این نقاط حیاتی، SVMها به‌طور مؤثر خطر بیش از حد برازش را به حداقل می‌رسانند و تعمیم به داده‌های دیده نشده را افزایش می‌دهند (Lin, 2005; Noble, 2006).

یکی از مزایای قابل توجه SVM توانایی آن در مدیریت هر دو دسته‌بندی خطی و غیرخطی از طریق استفاده از توابع هسته است. زمانی که داده‌ها به‌صورت خطی قابل تفکیک نیستند، SVM از ترفندهای هسته برای ترسیم ویژگی‌های ورودی در فضایی با ابعاد بالاتر استفاده می‌کند که در آن جداسازی خطی امکان‌پذیر است. توابع رایج کرنل شامل چند جمله‌ای، تابع پایه شعاعی (RBF) و هسته‌های سیگموئید است که به SVMها اجازه می‌دهد تا با انواع مختلف توزیع داده‌ها سازگار شوند. این انعطاف‌پذیری SVM را برای طیف وسیعی از کاربردها از جمله طبقه‌بندی متن، تشخیص تصویر و بیوانفورماتیک مناسب می‌کند (Kecman, 2005; Pradhan, 2012).

پایه ریاضی SVM شامل رابطه‌های یک مسئله بهینه‌سازی است که به دنبال به حداکثر رساندن حاشیه و در عین حال طبقه‌بندی صحیح داده‌های آموزشی است. این معمولاً با استفاده از روش‌های بهینه‌سازی محدب به‌دست می‌آید، و اطمینان حاصل می‌شود که راه‌حل در سطح جهانی بهینه است. تابع تصمیم‌گیری مشتق شده از SVM فقط توسط بردارهای پشتیبانی تعیین می‌شود و آن را از نظر حافظه کارآمد و در برابر نویز در مجموعه

در این مطالعه روش آنالیز 2002 IMPACT+ برای ارزیابی بارهای اکولوژیکی و تأثیر محیط زیستی بر منابع آبی استفاده شد. این روش اثرات محیط زیستی را به آسیب‌های نقطه میانی و آسیب‌های نقطه پایانی دسته بندی می‌کند. اثرات محیط زیستی نقطه میانی دارای پانزده دسته بندی می‌باشد که از این دسته بندی موارد Aquatic acidification، Aquatic ecotoxicity و Aquatic eutrophication مربوط به شاخص‌های آلاینده‌های منابع آب می‌باشند. بر این اساس موارد نوع سوخت و میزان خوردگی و محتوای روغن موتور به‌عنوان پارامترهای مستقل و موارد Aquatic acidification، Aquatic ecotoxicity و Aquatic eutrophication به‌عنوان پارامترهای وابسته و تعیین‌کننده اثرات محیط زیستی بر روی منابع آبی انتخاب شدند.

۲-۴- مدل‌سازی

در این مطالعه از روش ماشین بردار پشتیبان (SVM) برای مدل‌سازی استفاده شد. SVM دسته‌ای از الگوریتم‌های یادگیری نظارت‌شده هستند که عمدتاً برای کارهای طبقه‌بندی و مدل‌سازی در یادگیری ماشین استفاده می‌شوند. وظیفه اصلی SVM شناسایی ابر صفحه بهینه است که نقاط داده متعلق به کلاس‌های مختلف را در فضایی با ابعاد بالا جدا می‌کند. این ابر صفحه با به حداکثر رساندن حاشیه تعیین می‌شود که فاصله بین ابر صفحه و نزدیکترین نقاط داده از هر کلاس است که به‌عنوان

آموزش داده می‌شود. این روش با استفاده از کلاس RFE scikit-learn پیاده‌سازی شد.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- خواص نمونه‌های سوخت

این بخش از پژوهش نتایج به‌دست آمده از آنالیز خواص فیزیکی و شیمیایی سوخت را ارائه می‌دهد. سوخت B0 نمایانگر نمونه سوخت شاهد (سوخت دیزل خالص)، و اعداد ۲، ۵ و ۱۰ به‌ترتیب درصد‌های بیودیزل در سوخت دیزل را نشان می‌دهد.

مطابق با شکل ۱ (الف) چگالی سوخت با افزودن بیودیزل افزایش جزئی را نشان می‌دهد (از ۰/۸۶۰ گرم بر سانتی‌متر مکعب برای B0 به ۰/۸۶۳ گرم بر سانتی‌متر مکعب برای B10). بیودیزل به‌طور کلی در مقایسه با دیزل چگالی بالاتری دارد و این تغییر با نسبت‌های ترکیبی مطابقت دارد. چگالی بالاتر می‌تواند منجر به افزایش دبی جرمی در حین تزریق شود که ممکن است کمی عملکرد موتور و آلایندگی‌ها را تغییر دهد. Hoekman et al. (2012) تأکید کرد که مخلوط‌های بیودیزل چگالی بالاتری را به‌دلیل ساختار مولکولی بیودیزل نشان می‌دهند که به‌دلیل حضور اتم‌های اکسیژنی است که سوخت دیزل فاقد آن است. این ویژگی برای اختلاط سوخت و هوا مفید است اما می‌تواند بر راندمان احتراق تأثیر بگذارد.

مطابق شکل ۱ (ب)، ویسکوزیته نمونه سوخت‌ها با افزایش محتوای بیودیزل در ترکیب سوخت، از ۲/۹ میلی‌متر مربع بر ثانیه برای دیزل خالص (B0) به ۳/۰۸ میلی‌متر مربع بر ثانیه برای B10 افزایش می‌یابد. این روند مورد انتظار است زیرا بیودیزل معمولاً به‌دلیل وجود استرهای اسید چرب ویسکوزیته بالاتری نسبت به گازوئیل نفتی دارد (Faizollahzadeh Ardabili, 2021). افزایش ویسکوزیته می‌تواند بر اتمیزه شدن سوخت در حین تزریق تأثیر بگذارد و به‌طور بالقوه بر راندمان احتراق و انتشار تأثیر بگذارد. در همین راستا (Dhar and Agarwal 2014) گزارش دادند که مخلوط‌های بیودیزل تمایل به ویسکوزیته بالاتری دارند که می‌تواند بر فرآیند احتراق در موتورهای دیزل به‌ویژه در سطوح ترکیبی بالا تأثیر بگذارد.

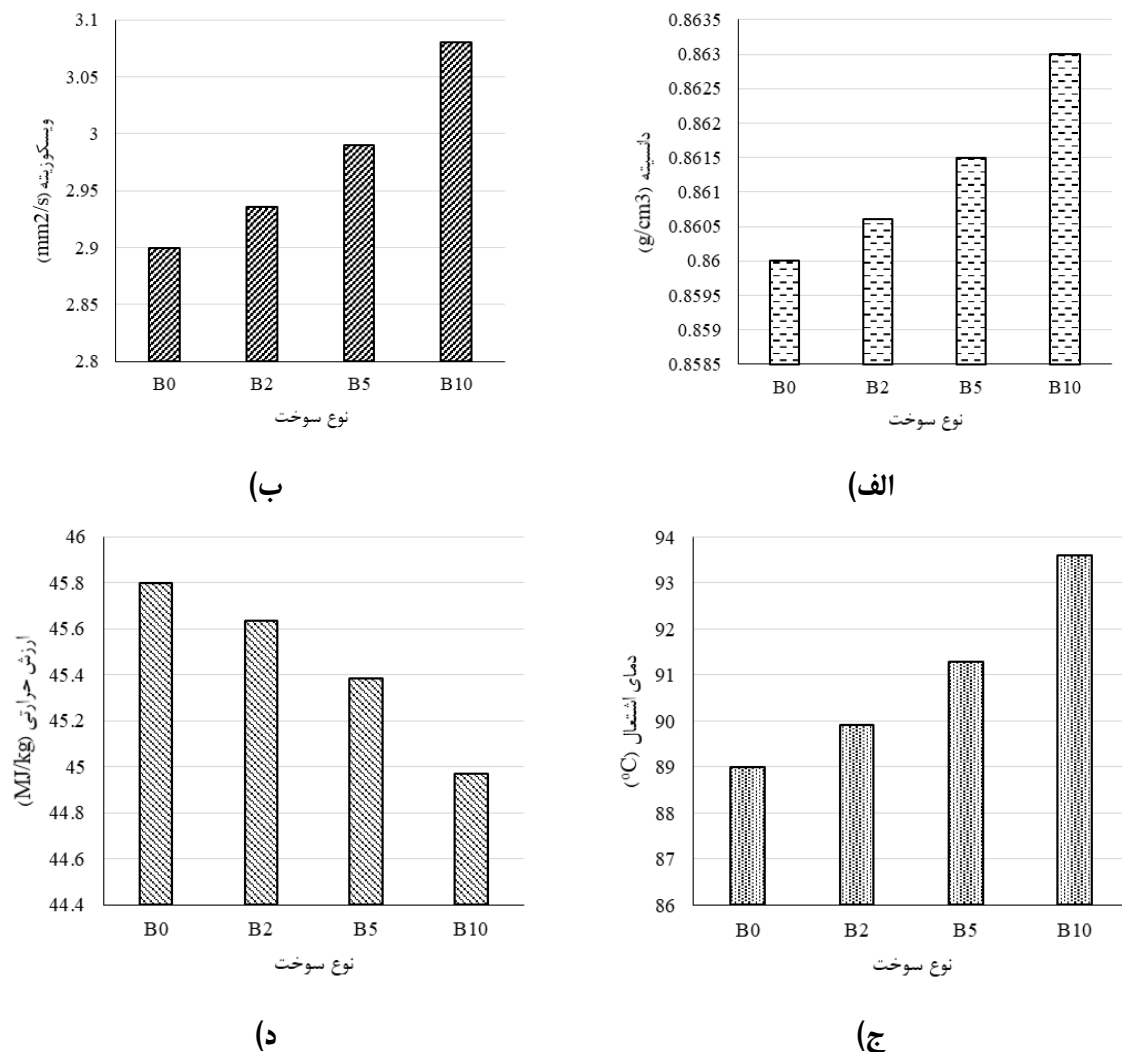
داده قوی می‌کند. در نتیجه، SVM به‌دلیل اثربخشی آن در وظایف طبقه‌بندی پیچیده، به یک انتخاب محبوب در میان پزشکان تبدیل شده است (Awad et al., 2015; Suthaharan, 2016).

در این مطالعه از پلتفرم پایتون برای پیاده‌سازی روش SVM استفاده شد. برای پیاده‌سازی SVM در پایتون، کتابخانه scikit-learn به‌دلیل سادگی و کارایی آن استفاده شد. پس از آماده‌سازی مجموعه داده، که شامل تقسیم آن به مجموعه‌های داده‌های آموزش (۶۰ درصد) و آزمون مدل (۴۰ درصد)، یک نمونه از طبقه‌بندی‌کننده SVM با استفاده از SVC از (sklearn.svm) ایجاد شد و هسته مورد نظر را مشخص کرد. سپس مدل با استفاده از روش (fit) روی داده‌های آموزش، با استفاده از روش (predict) روی داده‌های جدید پیش‌بینی کند. در این مطالعه از پارامترهای میانگین مربعات خطا (RMSE) و ضریب همبستگی (CC) برای ارزیابی نتایج به‌دست آمده استفاده شد (رابطه ۱ و ۲).

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \hat{x}_i)^2} \quad (1)$$

$$Correlation\ Coefficient = \frac{Cov(x, \hat{x})}{\sigma_x \sigma_{\hat{x}}} \quad (2)$$

استفاده از SVM برای انتخاب متغیر مستقل مؤثر، گامی حیاتی در ساخت مدل‌های دقیق می‌باشد. فرآیند انتخاب ویژگی به شناسایی مرتبط‌ترین متغیرهایی که به‌طور قابل توجهی به عملکرد مدل کمک می‌کنند، در نتیجه تفسیرپذیری را بهبود می‌بخشد، برآزش بیش از حد را کاهش می‌دهد و کارایی محاسباتی را افزایش می‌دهد. در این مطالعه از روش حذف ویژگی بازگشتی استفاده شد. این روش با حذف بازگشتی حداقل ویژگی‌های مهم بر اساس عملکرد مدل کار می‌کند. این فرآیند با آموزش SVM در مورد کل مجموعه ویژگی‌ها و سپس رتبه‌بندی آنها بر اساس اهمیت آنها شروع می‌شود که معمولاً با وزن اختصاص داده شده به هر ویژگی در تابع تصمیم‌گیری اندازه‌گیری می‌شود. پس از رتبه‌بندی، کم‌اهمیت‌ترین ویژگی‌ها به‌طور مکرر حذف می‌شوند و مدل تا رسیدن به تعداد مطلوب ویژگی‌ها مجدداً



شکل ۱- نتایج آنالیز خواص فیزیکی-حرارتی نمونه سوخت‌ها. الف) دانسیته، ب) ویسکوزیته، ج) ارزش حرارتی، د) دمای اشتعال
Figure 1 - Results of analysis of physical-thermal properties of fuel samples. a) Density, b) Viscosity, c) Calorific value, and d) Ignition temperature

شود (Loo et al., 2021). (Knothe (2005) خاطرنشان کرد که طبیعت اکسیژن‌دار بیودیزل به ارزش کالری کمتری در مقایسه با دیزل کمک می‌کند و در نتیجه زمانی که از مخلوط‌های بیودیزل بالاتر استفاده می‌شود، توان خروجی کمی کاهش می‌یابد.

۳-۲- نتایج آنالیز عملکردی و آلاینده‌گی موتور

شکل ۲ نتایج حاصل از ارزیابی عملکردی و آلاینده‌گی موتور دیزل در حضور نمونه سوخت‌ها را نشان می‌دهد. مطابق با شکل ۲ (الف) توان ترمزی با افزایش محتوای بیودیزل کاهش می‌یابد (از ۱/۴۹۷ کیلووات برای B0 به ۱/۰۹۵ کیلووات برای B10). هرچند این روند کاهش توان ترمزی انتظار می‌رود، زیرا بیودیزل ارزش حرارتی کمتری نسبت به دیزل دارد. چگالی انرژی کمتر بیودیزل منجر به آزاد شدن انرژی کمتر در حین احتراق می‌شود که منجر به کاهش خروجی موتور در ترکیبات بیودیزل بالاتر می‌شود.

مطابق با شکل ۱ (ج) با افزایش محتوای بیودیزل، نقطه اشتعال به‌طور قابل توجهی افزایش می‌یابد (از ۸۹ درجه سانتی‌گراد برای B0 به ۹۳/۶ درجه سانتی‌گراد برای B10). بیودیزل در مقایسه با دیزل نقطه اشتعال بالاتری دارد و این امر باعث می‌شود که مخلوط‌ها ایمن‌تر حمل و نگهداری شوند. نقطه اشتعال بالاتر همچنین خطر احتراق سوخت را در شرایط ذخیره‌سازی در دمای بالا کاهش می‌دهد.

مطابق با شکل ۱ (د) ارزش حرارتی با افزودن بیودیزل از ۴۵/۸ مگاژول بر کیلوگرم برای B0 به ۴۴/۹۷ مگاژول بر کیلوگرم برای B10 کاهش می‌یابد. این کاهش به دلیل محتوای انرژی کمتر بیودیزل در مقایسه با دیزل است، زیرا بیودیزل حاوی مولکول‌های اکسیژن است که باعث کاهش چگالی انرژی کلی آن می‌شود. این کاهش ممکن است منجر به کاهش جزئی در توان خروجی موتور هنگام استفاده از مخلوط‌های بیودیزل بالاتر

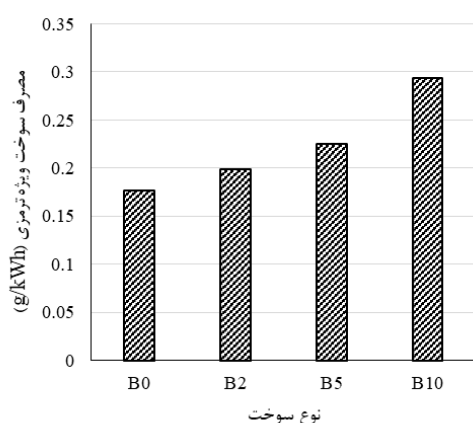
ماهیت اکسیژن دار بیودیزل است که باعث احتراق کامل‌تر می‌شود. این یک مزیت محیط زیستی قابل توجه استفاده از مخلوط‌های بیودیزل است. (Lapuerta et al. (2008) تاکید کردند که بیودیزل به دلیل محتوای اکسیژن بالاتر، انتشار مونوکسیدکربن را کاهش می‌دهد و به اکسیداسیون کربن به سمت تولید دی‌اکسیدکربن کمک می‌کند.

مطابق با شکل ۲ (د) انتشار اکسیدهای نیتروژن با محتوای بیودیزل بالاتر از ۲۹۴ ppm برای B0 به ۴۲۰ ppm برای B10 افزایش می‌یابد. افزایش اکسیدهای نیتروژن به دلیل دمای احتراق و محتوای اکسیژن بالاتر در بیودیزل است که به تشکیل اکسیدهای نیتروژن حرارتی کمک می‌کند. این یک مبادله رایج در ارتباط با استفاده از بیودیزل است. به گفته Ban-Weiss et al. (2007) دمای شعله بالاتر و در دسترس بودن اکسیژن در مخلوط‌های بیودیزل به افزایش انتشار اکسیدهای نیتروژن کمک می‌کند.

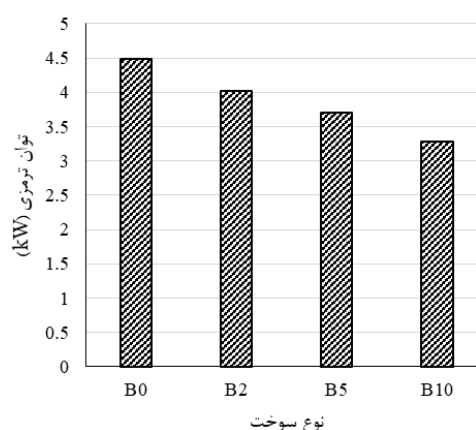
همان‌طور که توسط Knothe (2005) اشاره شد، ماهیت اکسیژن‌دار بودن بیودیزل منجر به کاهش چگالی انرژی می‌شود و بر عملکرد موتور در ترکیب‌های بالاتر تأثیر می‌گذارد.

مطابق با شکل ۲ (ب) مصرف سوخت ویژه ترمزی با افزایش محتوای بیودیزل در سوخت به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد (از ۰/۱۷۷ کیلوگرم در کیلووات ساعت برای B0 به ۰/۲۹۳ کیلوگرم در کیلووات ساعت برای B10). افزایش مصرف سوخت ویژه ترمزی به ارزش حرارتی پایین بیودیزل نسبت داده می‌شود که به سوخت بیش‌تری برای تولید توان خروجی یکسان نیاز دارد. این روند رایجی است که در ترکیبات بیودیزل-دیزل مشاهده می‌شود. (Hoekman et al. (2012) همچنین گزارش داد که مخلوط‌های بیودیزل معمولاً مصرف سوخت ویژه ترمزی بالاتری را به دلیل کاهش چگالی انرژی نشان می‌دهند.

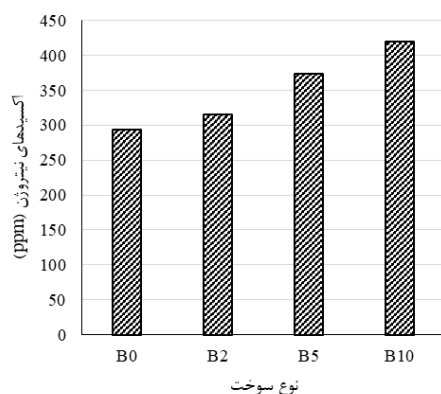
مطابق با شکل ۲ (ج) انتشار مونوکسیدکربن با افزایش محتوای بیودیزل کاهش می‌یابد (از ۲۳۲۲ ppm برای B0 به ۲۰۹۵ ppm برای B10). کاهش انتشار مونوکسیدکربن به دلیل



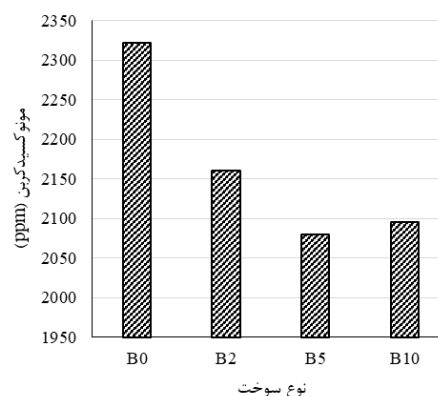
(ب)



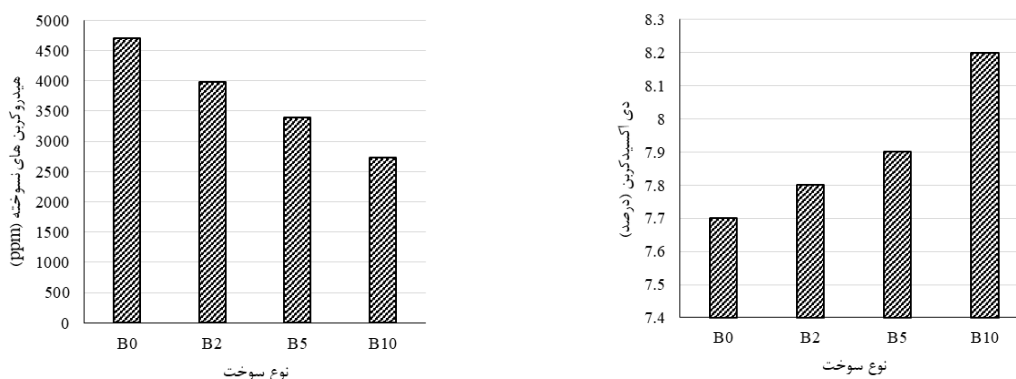
(الف)



(د)



(ج)



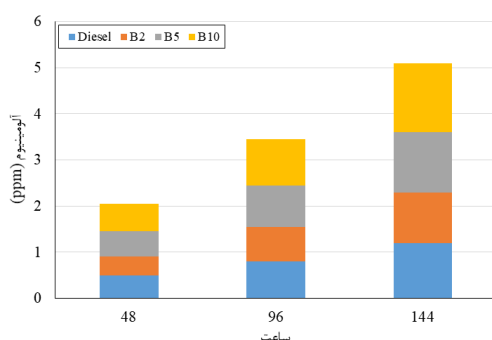
(و)

(ه)

شکل ۲- نتایج حاصل از آزمون عملکرد و آلایندگی موتور. الف) توان ترمزی، ب) مصرف سوخت ویژه ترمزی، ج) انتشار مونوکسیدکربن، د) انتشار اکسیدهای نیتروژن، ه) انتشار دی اکسیدکربن، و) انتشار هیدروکربن های نسوخته

Figure 2- Engine performance and emissions test results. a) Brake power, b) Brake specific fuel consumption, c) Carbon monoxide emissions, d) Nitrogen oxides emissions, e) Carbon dioxide emissions, and f) Unburned hydrocarbon emissions

روغن را کاهش می‌دهد و در نتیجه خوردگی بخش‌های آلومینیومی محفظه احتراق را محدود می‌کند. سطوح کروم (Cr) به دلیل عدم زمان کافی برای سایش قابل توجه ناشی از خوردگی کروم نسبتاً پایین باقی می‌ماند (شکل ۳ ب). علاوه بر این، تغییرات در سطوح مس و آهن حداقل است، زیرا فرآیندهای خوردگی و سایش تأثیر کمتری در این دوره کوتاه دارند (شکل ۳ ج و ۳ د). مشاهده می‌شود، اثرات سوخت‌های بیودیزل با درصد‌های بالاتر (B10 و B5) در این مرحله کمتر مشخص است، که نشان می‌دهد عملکرد کوتاه مدت به طور قابل توجهی فرآیندهای سایش یا خوردگی را تشدید نمی‌کند (Berlanga-Labari et al., 2020; Hong et al., 2012; Osarolube et al., 2008).



(الف)

مطابق با شکل ۲ ه) انتشار دی اکسیدکربن با محتوای بیودیزل کمی افزایش می‌یابد (از ۷/۷ درصد برای B0 به ۸/۲ درصد برای B10)، افزایش انتشار دی اکسیدکربن به دلیل احتراق کامل تر بیودیزل است. در حالی که انتشار دی اکسیدکربن بیش تر است، تأثیر خالص دی اکسیدکربن کمتر است، زیرا بیودیزل از زیست توده تجدید پذیر حاصل می‌شود که دی اکسیدکربن را در طول رشد جذب می‌کند (Faizollahzadeh Ardabili, 2021). (Hoekman et al., 2012) همچنین روند مشابهی را در ترکیبات بیودیزل یافت و به مزایای محیط زیستی چرخه‌های کربن بسته اشاره کرد.

مطابق با شکل ۲ و) انتشار هیدروکربن‌های نسوخته با محتوای بیودیزل بالاتر به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد (از ۴۷۰۰ ppm برای B0 به ۲۷۲۶ ppm برای B10). کاهش انتشار هیدروکربن‌های نسوخته به دلیل ماهیت اکسیژن دار بیودیزل است که اکسیداسیون هیدروکربن‌ها را در طی احتراق تسهیل می‌کند. این روند منجر به انتشار کم تر هیدروکربن‌های نسوخته در آگروز می‌شود. (Lapuerta et al., 2008) همچنین کاهش انتشار هیدروکربن‌های نسوخته را با ترکیبات بیودیزل به دلیل ویژگی‌های احتراق بهتر آنها گزارش کرد.

۳-۳- نتایج آنالیز روغن موتور

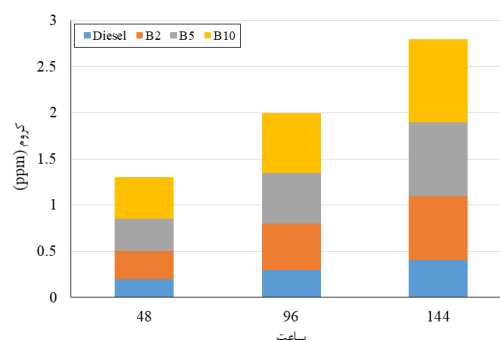
مطابق با شکل ۳، تأثیر زمان عملکرد موتور در حضور نمونه سوخت‌ها بر خوردگی موتور در سه بازه زمانی ۴۸، ۹۶ و ۱۴۴ ساعت مشخص است. در طول مدت زمان کارکرد ۴۸ ساعته، مشاهده می‌شود که میزان آلومینیوم (Al) در روغن موتور افزایش جزئی را نشان می‌دهد (شکل ۳ الف). این فرایند به زمان عملیاتی کوتاه تر نسبت داده می‌شود که اکسیداسیون سوخت و اسیدیته

احتراق بیودیزل به خوردگی اجزای آهن کمک می‌کند (شکل ۳ د). بنابراین اثرات نامطلوب بیودیزل با درصد‌های بالاتر در این بازه زمانی مشهودتر می‌شود (Gao et al., 2020).

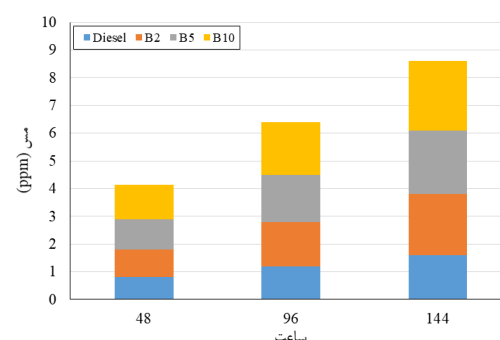
مطابق با شکل ۳، در مدت زمان کارکرد ۱۴۴ ساعته موتور در حضور نمونه سوخت‌ها، سطح آلومینیوم به دلیل تجمع اسیدها و افزایش اکسیداسیون روغن به طور چشم‌گیری افزایش می‌یابد و منجر به خوردگی شدیدتر اجزای آلومینیومی می‌شود (شکل ۳ الف). سایش قطعات کروم و مس نیز در این مرحله به میزان قابل توجهی افزایش می‌یابد (شکل ۳ ب و ۳ ج). آهن به حداکثر غلظت خود می‌رسد زیرا اسیدها به سطوح آهن حمله می‌کنند و باعث تجمع محصولات خوردگی در روغن موتور می‌شوند (شکل ۳ د). در این مرحله، اثرات مضر ترکیبات بیودیزل بالاتر (به ویژه B10) به طور قابل توجهی مشخص می‌شود، که افزایش قابل توجهی در سایش و نرخ خوردگی فلز را برجسته می‌کند. این تجزیه و تحلیل نشان می‌دهد که در حالی که اثرات کوتاه مدت (۴۸ ساعت) محدود است، قرار گرفتن در معرض میان مدت (۹۶ ساعت) منجر به افزایش تخریب می‌شود که منجر به حداکثر اثرات مخرب در مدت‌های طولانی‌تر (۱۴۴ ساعت) می‌شود. برای کاهش این مشکلات، توصیه‌هایی شامل استفاده از روغن موتور با افزودنی‌های مناسب، انجام تعویض منظم روغن و استفاده از سوخت‌های بیودیزل با کیفیت بالا می‌باشد (Nurrochman et al., 2023; Popov, 2015).

۳-۴- ارزیابی چرخه حیات با رویکرد تأثیر بر منابع آبی

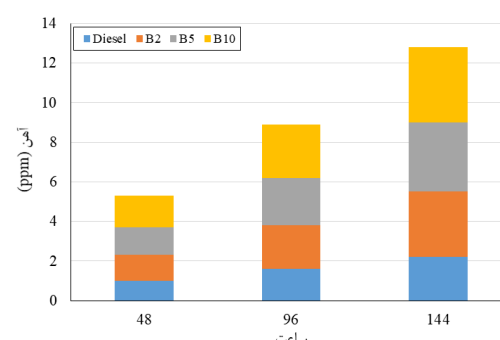
شکل ۴ تأثیرات محیط زیستی چرخه حیات خوردگی موتور بر منابع آبی را ارائه می‌دهد. مطابق با شکل ۴ الف مقادیر سمیت محیط زیستی منابع آبی برای همه نمونه سوخت‌ها با افزایش مدت زمان عملکرد موتور افزایش می‌یابد. افزودن بیودیزل (به ویژه B10) اثرات قابل توجه بالاتری از دیزل خالص نشان می‌دهد. این پدیده را می‌توان به چندین عامل اساسی نسبت داد. در درجه اول افزایش سایش فلز و هیدروکربن‌های نسوخته می‌تواند موجب ایجاد این روند صعودی باشد، همچنین خواص شیمیایی بیودیزل، مانند محتوای اکسیژن بالاتر و سطح گوگرد پایین تر، منجر به تأثیر در فرایند احتراق و تولید محصولات جانبی اسیدی می‌شود. این اسیدها باعث خوردگی و سایش اجزای موتور می‌شوند و در نتیجه فلزاتی مانند آلومینیوم (Al)، مس (Cu)، کروم (Cr) و آهن (Fe) در روغن موتور و اکزوز آزاد می‌شوند. هنگامی که این فلزات به طور نادرست دفع شوند، می‌توانند به سیستم‌های آبی نفوذ کنند و سطح سمیت را برای زندگی موجودات آبی افزایش دهند (شکل ۴ الف). انتشارات ناشی از سایش به ویژه با محتوای بیودیزل بالاتر



(ب)



(ج)



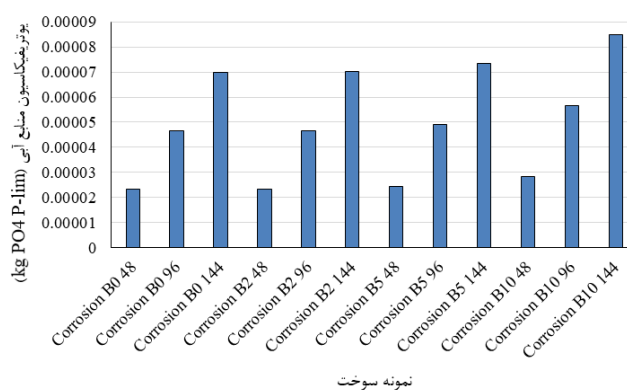
(د)

شکل ۳- نتایج حاصل از آنالیز روغن موتور. الف) محتوای آلومینیوم، ب) محتوای کروم، ج) محتوای مس، د) محتوای آهن
Figure 3 - Results from engine oil analysis. a) Aluminum content, b) Chromium content, c) Copper content, and d) Iron content

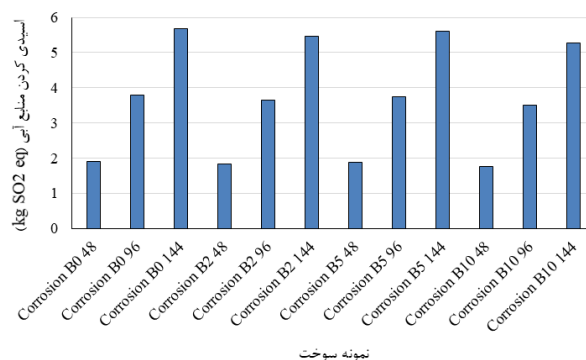
مطابق با شکل ۳، در مدت زمان کارکرد ۹۶ ساعته موتور در حضور نمونه سوخت‌ها، افزایش سطح آلومینیوم به دلیل اکسیداسیون سوخت تشدید شده (شکل ۳ الف)، به ویژه با بیودیزل B10، که حاوی مقادیر بیش‌تری از اسیدهای آلی است، مشاهده می‌شود. به طور همزمان، سایش کروم در نتیجه تجمع آب و محصولات جانبی اسیدی افزایش می‌یابد (شکل ۳ ب). سطح مس نیز به دلیل تخریب اکسیداتیو روغن و تجزیه مواد افزودنی محافظ افزایش می‌یابد (شکل ۳ ج). محتوای آهن در این فاصله به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد زیرا اسیدهای تولید شده از

تشکیل می‌شود که سمیت محیط زیستی را تشدید می‌کنند. در نتیجه، غلظت‌های بالا از فلزات و هیدروکربن‌ها در انتشار گازهای گلخانه‌ای، ترکیبات بیودیزل - به‌ویژه B10 - را به‌عنوان عوامل مهمی در سمیت آب در مقایسه با دیزل خالص نشان می‌دهد. این امر بر ضرورت پرداختن به فرسودگی موتور و انتشار آگروز در هنگام فرموله کردن ترکیبات سوخت بیودیزل برای کاهش اثرات محیط زیستی آنها تأکید می‌کند (Pham et al., 2023).

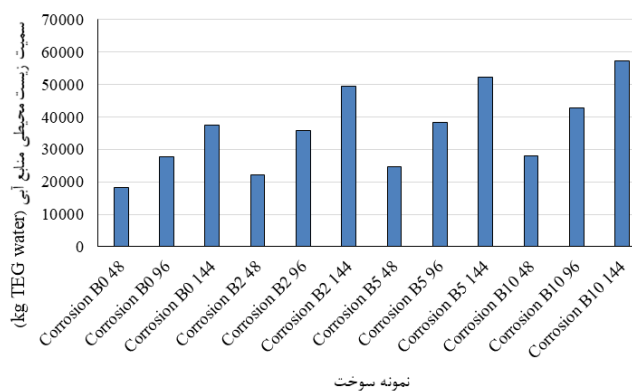
(B10) مشخص می‌شود، زیرا افزایش ویسکوزیته و قطبیت بیودیزل تعامل آن را با سطوح موتور افزایش می‌دهد و منجر به سایش بیش‌تر می‌شود. علاوه بر این، مخلوط‌های بیودیزل تمایل به تولید هیدروکربن‌های نسوخته بالاتری در طی احتراق دارند که ممکن است شامل هیدروکربن‌های آروماتیک چند حلقه‌ای باشد که به‌دلیل اثرات سمی خود بر موجودات آبی شناخته می‌شوند. علاوه بر این، بیودیزل در مقایسه با دیزل فسیلی در برابر اکسیداسیون حساس‌تر است و در نتیجه ترکیبات پراکسیدی



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۴- تأثیرات محیط زیستی چرخه حیات خوردگی موتور بر منابع آبی. الف) یوتریفیکاسیون منابع آبی، ب) اسیدی کردن منابع آبی، ج) سمیت محیط زیستی منابع آبی

Figure 4 - Environmental impacts of engine corrosion life-cycle on water resources. a) Eutrophication of water resources, b) Acidification of water resources, and c) Ecotoxicity of water resources

می‌کند، فرآیندی که می‌تواند منجر به شکوفه‌های مضر جلبکی شود. علاوه بر این، احتراق ناقص مرتبط با ویسکوزیته بالاتر بیودیزل منجر به انتشار ذرات آلی می‌شود که اغلب غنی از مواد مغذی هستند و باعث تشدید اتروفیکاسیون در بدنه‌های آبی می‌شود. ترکیب بیودیزل، به‌ویژه متیل استرها، اسید چرب آن، به آزادسازی ترکیبات آلی حاوی نیتروژن در طول زمان کمک می‌کند و منجر به اضافه بار مواد مغذی در محیط‌های آبی می‌شود. اگرچه مخلوط‌های بیودیزل وابستگی به سوخت‌های فسیلی و انتشار ذرات معلق را کاهش می‌دهند، سهم آن‌ها در اتروفیکاسیون مستلزم نظارت و مدیریت دقیق انتشار اکسیدهای نیتروژن و زیاله‌های آلی برای کاهش اثرات محیط زیستی آن‌ها است (van Wijnjen et al., 2015).

۳-۵- نتایج مدل‌سازی

این بخش از پژوهش به ارائه مدل‌سازی برای تخمین سه پارامتر یوتریفیکاسیون منابع آبی، اسیدی کردن منابع آبی و سمیت محیط زیستی منابع آبی با به‌کارگیری روش SVM می‌پردازد تا بتواند با توسعه این مدل به مرحله بعدی یعنی انجام تحلیل حساسیت و دسترسی به متغیرهای مستقل مؤثر بر متغیرهای وابسته دست یابد. این مرحله مستلزم توسعه دقیق مدل می‌باشد. جدول ۵ نتایج مرحله آموزش مدل را ارائه می‌دهد. همان‌طور که مشخص می‌باشد، مدل SVM با استفاده از کرنل چندجمله‌ای عملکرد مناسبی در پیش‌بینی سه پارامتر مورد بررسی داشته است. مقادیر کم RMSE و مقادیر بالای CC نشان می‌دهد که این مدل از دقت و قابلیت تعمیم‌پذیری بالایی برای پیش‌بینی برخوردار است. به‌ویژه در پیش‌بینی پارامتر سمیت محیط زیستی منابع آبی که دقت آن بالا می‌باشد ($CC=0.99$).

شکل ۵ نتایج مربوط به مرحله آزمون مدل SVM را ارائه می‌دهد. همان‌طور که مشخص است در مرحله آزمون نیز دقت شبکه بالای ۹۰ درصد می‌باشد که این نشان از قابل اعتماد بودن مدل توسعه یافته برای حضور در مرحله آنالیز حساسیت می‌باشد. جدول ۶ نتایج مرحله آنالیز حساسیت با روش حذف ویژگی بازگشتی برای تمام متغیرهای وابسته و مستقل را نشان می‌دهد.

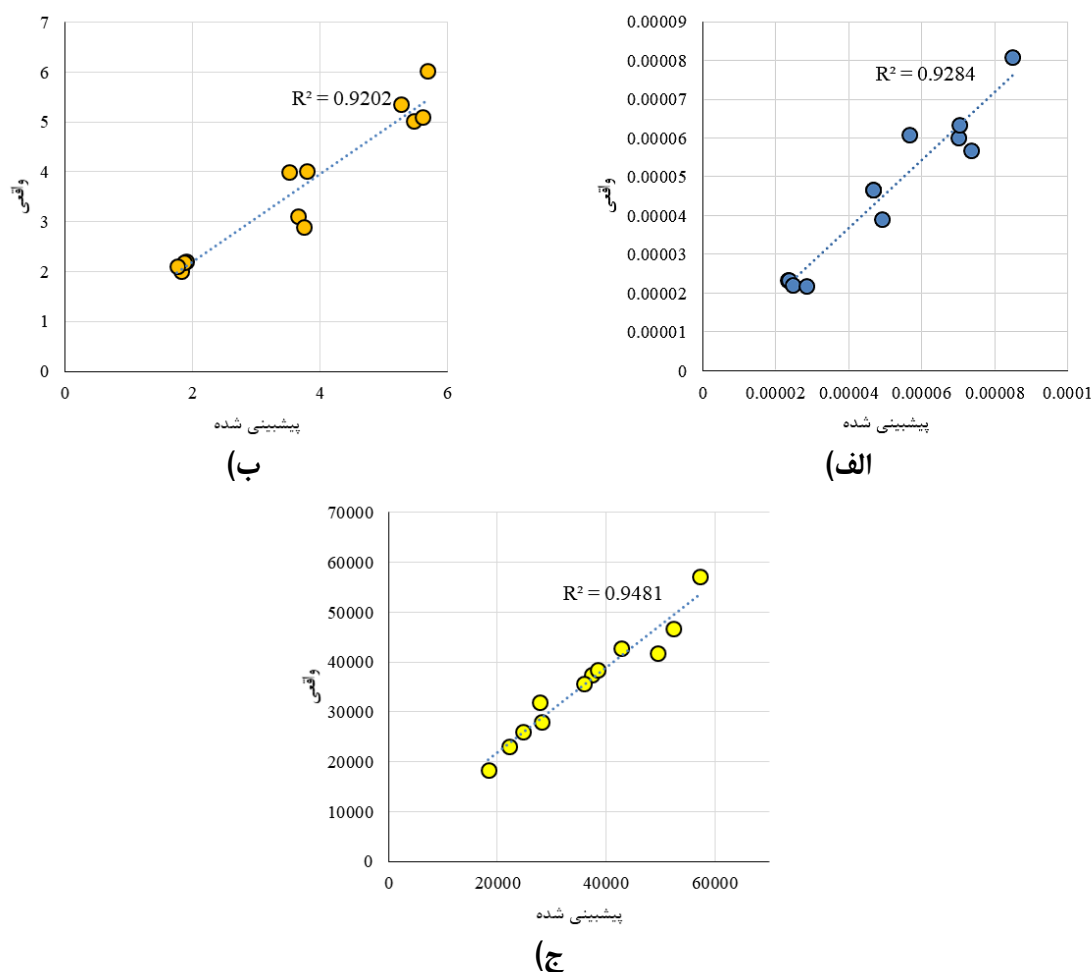
اسیدی‌شدن آب یک نگرانی محیط زیستی حیاتی است، زیرا مخلوط‌های بیودیزل پتانسیل اسیدی بالاتری را در مقایسه با سوخت‌های دیزل معمولی نشان می‌دهند (به‌ویژه نمونه سوخت B10) (شکل ۴ ب). این افزایش اسیدی شدن در درجه اول به انتشار اکسیدهای نیتروژن بالاتر ناشی از احتراق بیودیزل نسبت داده می‌شود. ماهیت اکسیژن‌دار بیودیزل راندمان احتراق را افزایش می‌دهد، که در عین مفید بودن، منجر به افزایش دمای شعله می‌شود که محرک اصلی تشکیل اکسیدهای نیتروژن است. هنگامی که اکسیدهای نیتروژن در اتمسفر آزاد می‌شود، با بخار آب واکنش می‌دهد و اسید نیتریک را تشکیل می‌دهد که یک عامل قوی در اسیدی شدن آب است. علاوه بر این، اگرچه بیودیزل دارای محتوای گوگرد ناچیزی در مقایسه با گازوئیل است - در نتیجه انتشار دی‌اکسید گوگرد را کاهش می‌دهد - مزایای آن با افزایش انتشار اکسیدهای نیتروژن و محصولات جانبی اسیدی تولید شده در طی احتراق متعادل می‌شود (Dhar & Agarwal, 2014). همان‌طور که کارکرد موتور در مدت زمان طولانی تری ادامه می‌یابد، تجمع اکسیدهای نیتروژن و مواد واسطه اسیدی تشدید می‌شود و پتانسیل اسیدی شدن را تقویت می‌کند، به‌ویژه در داده‌های جمع‌آوری شده در مدت زمان عملکردی ۱۴۴ ساعت برای همه نمونه سوخت‌ها مشهود است. این یافته‌ها بر ضرورت اجرای سیستم‌های پس از تصفیه کاتالیزوری، مانند کاتالیزورهای کاهش اکسیدهای نیتروژن، برای کاهش اثرات اسیدی شدن مرتبط با استفاده از بیودیزل و افزایش پایداری محیطی تاکید می‌کند (Gaide et al., 2024).

یوتریفیکاسیون آب یک چالش محیط زیستی قابل توجهی را ایجاد می‌کند، به‌ویژه به این دلیل که مخلوط‌های بیودیزل پتانسیل یوتریفیکاسیون به‌طور قابل توجهی را در مقایسه با سوخت‌های دیزل معمولی نشان می‌دهند (B10 در ۱۴۴ ساعت عملکرد موتور) (شکل ۴ ج). این افزایش یوتریفیکاسیون عمدتاً ناشی از انتشار اکسیدهای نیتروژن بالاتر است که از احتراق بیودیزل ناشی می‌شود. اکسیدهای نیتروژن هنگامی که در اکوسیستم‌های آبی رسوب می‌کند به‌عنوان یک ماده مغذی عمل می‌کند و رشد بیش از حد جلبک‌ها و گیاهان آبی را تحریک

جدول ۵- نتایج مرحله آموزش مدل ماشین بردار پشتیبان

Table 5- Results of the support vector machine model training stage

پارامتر	تنظیمات مدل	نوع کرنل	RMSE	CC
یوتریفیکاسیون منابع آبی	Cost=502, v=0.7, g=0.8, c=1, d=3	Polynomial	5.97E-06	0.97
اسیدی کردن منابع آبی			0.32	0.96
سمیت محیط زیستی منابع آبی			2985.21	0.99



شکل ۵- نتایج مرحله آزمون مدل ماشین بردار پشتیبان. الف) یوتروفیکاسیون منابع آبی، ب) اسیدی کردن منابع آبی، ج) سمیت محیط زیستی منابع آبی

Figure 5 - Results of the support vector machine model testing phase. a) Eutrophication of water resources, b) Acidification of water resources, and c) Environmental toxicity of water resources

(۰/۳۸) نشان می‌دهد. این نشان می‌دهد که در حالی که دوره عملکرد موتور به تخریب محیطی کمک می‌کند، تأثیر آنها در مقایسه با سایر پارامترها کم‌تر است. فرآیند تولید بیودیزل همچنین به‌طور قابل توجهی بر اتروفیکاسیون آب (۰/۵۱)، اسیدی شدن (۰/۷۵) و سمیت محیط زیستی (۰/۶۹) تأثیر می‌گذارد که بر اهمیت کیفیت تولید در به حداقل رساندن آسیب‌های محیط زیستی تأکید می‌کند. به‌طور مشابه، فرآیند آماده‌سازی سوخت اثرات متوسطی را روی یوتروفیکاسیون (۰/۴۹) و اسیدی شدن (۰/۵۹) نشان می‌دهد، اما تأثیر قوی‌تری بر سمیت محیط زیستی دارد (۰/۶۱).

در فرآیند احتراق به‌عنوان عامل اصلی هر سه شاخص با امتیاز ۰/۵۲ برای یوتروفیکاسیون، ۰/۷۵ برای اسیدی شدن، و ۰/۷۹ برای سمیت برجسته شده است، که نشان می‌دهد بهبود مدیریت فرآیندهای احتراق می‌تواند منجر به کاهش قابل توجه اثرات محیط زیستی شود. همچنین از جدول ۶ مشخص است که

مطابق با جدول ۶، تجزیه و تحلیل حساسیت انجام شده از طریق حذف ویژگی‌های بازگشتی ارزیابی جامعی از تأثیر پارامترهای مختلف مستقل بر سه شاخص محیط زیستی مرتبط با منابع آب (یوتروفیکاسیون، اسیدی شدن، و سمیت محیط زیستی) ارائه می‌دهد. تجزیه و تحلیل بر روی شش پارامتر مستقل انجام شد و نشان داد این پارامترها به‌طور قابل توجهی بر شاخص‌های محیط زیستی مرتبط با منابع آبی تأثیر می‌گذارد. درصد بیودیزل در سوخت به‌عنوان یک عامل حیاتی ظاهر شد و اثرات قابل توجهی را در تمام شاخص‌های محیطی نشان داد (با امتیاز تأثیر ۰/۵۵ برای یوتروفیکاسیون، ۰/۸۱ برای اسیدی شدن، و ۰/۷۶ برای سمیت محیط زیستی). این روند نشان می‌دهد که تغییرات در محتوای بیودیزل می‌تواند نقشی اساسی در کاهش یا تشدید اثرات محیط زیستی ایفا کند.

ساعات کار موتور تأثیر نسبتاً کم‌تری بر اتروفیکاسیون (۰/۴۵) و اسیدی شدن (۰/۶۱) با تأثیر حتی کم‌تر بر سمیت محیط زیستی

خوردگی موتور تأثیر عمیقی بر همه شاخص‌ها، به‌ویژه اسیدی شدن (۰/۸۴) و سمیت محیط زیستی (۰/۸۳) دارد، که نشان می‌دهد انتشارات مرتبط با خوردگی یک عامل کلیدی در آلودگی آب است.

جدول ۶- انجام آنالیز حساسیت برای یافتن پارامتر موثر بر اثرات محیط زیستی سایش موتور دیزل در آلودگی منابع آبی

Table 6- Conducting sensitivity analysis to find the effective parameter on the environmental effects of diesel engine wear on water resource pollution

پارامتر	نوع آنالیز حساسیت	یوتریفیکاسیون منابع آبی	اسیدی کردن منابع آبی	سمیت محیط زیستی منابع آبی
درصد بیودیزل در سوخت	حذف ویژگی بازگشتی	0.55	0.81	0.76
ساعت کاری موتور	حذف ویژگی بازگشتی	0.45	0.61	0.38
فرایند تولید بیودیزل	حذف ویژگی بازگشتی	0.51	0.75	0.69
فرایند آماده‌سازی نمونه سوخت‌ها	حذف ویژگی بازگشتی	0.49	0.59	0.61
فرایند احتراق	حذف ویژگی بازگشتی	0.52	0.75	0.79
خوردگی موتور	حذف ویژگی بازگشتی	0.79	0.84	0.83

۴- نتیجه‌گیری

این پژوهش به بررسی تأثیرات محیط زیستی استفاده از بیودیزل در تحلیل خوردگی موتورهای دیزل می‌پردازد. قبل از ورود به مرحله تحلیل محیط زیستی نیاز است تا نمونه سوخت‌ها آماده شده و سپس تحت آنالیز قرار گیرند. مطابق با انجام روش تحقیق نتایج زیر حاصل شد:

- بر اساس آنالیز خواص سوخت، مشخص شد که با افزایش درصد بیودیزل در سوخت، چگالی و ویسکوزیته سوخت افزایش می‌یابد، در حالی که ارزش حرارتی آن کاهش می‌یابد. این تغییرات می‌توانند تأثیرات قابل توجهی بر عملکرد موتور و انتشار آلاینده‌ها داشته باشند. به‌ویژه، افزایش ویسکوزیته ممکن است منجر به کاهش کارایی احتراق شود که در نهایت بر خروجی موتور تأثیر منفی می‌گذارد.

- نتایج ارزیابی عملکرد و آلاینده‌ی موتور نشان داد که با افزایش محتوای بیودیزل، توان ترمزی کاهش یافته و مصرف سوخت ویژه ترمزی افزایش می‌یابد. این روند به دلیل ارزش حرارتی پایین‌تر بیودیزل نسبت به دیزل خالص است. همچنین، انتشار مونوکسیدکربن با افزایش محتوای بیودیزل کاهش یافت، که ناشی از احتراق کامل‌تر این سوخت است. با این حال، انتشار اکسیدهای نیتروژن و دی‌اکسیدکربن به دلیل دماهای بالاتر احتراق و غلظت اکسیژن بیش‌تر در بیودیزل افزایش یافت.

- تحلیل نتایج آنالیز روغن موتور نشان داد که زمان کارکرد موتور تأثیر قابل توجهی بر سطوح فلزات در روغن موتور دارد. به‌ویژه، با گذشت زمان، سطوح آلومینیوم، کروم، مس و آهن تحت تأثیر اکسیداسیون و خوردگی قرار گرفتند. این نتایج نشان می‌دهد که استفاده از بیودیزل با درصد بالاتر

می‌تواند منجر به افزایش قابل توجهی در سایش و خوردگی قطعات موتور شود.

- اسیدی‌شدن و یوتریفیکاسیون منابع آبی از چالش‌های محیط زیستی مهمی هستند که با استفاده از مخلوط‌های بیودیزل، به‌ویژه B10، تشدید می‌شوند. افزایش اکسیدهای نیتروژن ناشی از احتراق بیودیزل، به‌عنوان یک ماده مغذی، منجر به رشد بیش از حد جلبک‌ها و افزایش اسیدیته آب می‌شود، که این امر به نوبه خود می‌تواند به آسیب‌های جدی به اکوسیستم‌های آبی منجر شود. بنابراین، برای کاهش اثرات منفی این سوخت‌ها بر محیط زیست، نیاز به نظارت دقیق بر انتشار اکسیدهای نیتروژن و اجرای سیستم‌های پس از تصفیه کاتالیزوری وجود دارد.

- در ادامه تحلیل حساسیت انجام شده با استفاده از روش حذف ویژگی‌های بازگشتی نشان داد که درصد بیودیزل در سوخت تأثیر قابل توجهی بر سه شاخص محیط زیستی مرتبط با منابع آبی دارد: یوتریفیکاسیون، اسیدی‌کردن و سمیت محیط زیستی. این یافته‌ها تأکید می‌کند که برای کاهش اثرات محیط زیستی ناشی از استفاده از بیودیزل، نیاز به بهینه‌سازی فرایندهای احتراق و انتخاب مواد مقاوم‌تر در برابر خوردگی وجود دارد.

برای ادامه پژوهش در زمینه تأثیرات محیط زیستی خاصیت خوردگی موتور دیزل در حضور نمونه سوخت‌های حاوی بیودیزل بر منابع آبی، پیشنهاد می‌شود که مطالعات بیش‌تری بر روی بهینه‌سازی فرایندهای احتراق و کاهش انتشار اکسیدهای نیتروژن انجام شود. به‌ویژه، بررسی تأثیر استفاده از افزودنی‌های خاص در بیودیزل می‌تواند به کاهش اثرات منفی بر روی اسیدی‌شدن و یوتریفیکاسیون کمک کند.

تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچ‌گونه تضاد منافی در خصوص نگارش و انتشار مطالب و نتایج این پژوهش ندارند.

دسترسی به داده‌ها

داده‌ها و نتایج استفاده شده در این پژوهش از طریق مکاتبه با نویسنده مسئول در اختیار قرار خواهد گرفت

مشارکت نویسندگان

رامین مشکابادی: مفهوم سازی، نظارت، روش شناسی؛ سینا اردبیلی: نرم افزار، نگارش - تهیه پیش نویس اصلی، تحلیل و بررسی رسمی؛ عزیز باباپور: بازنگری، نظارت؛ محمد احمدی: ویرایش نسخه خطی، منابع؛ علیرضا طلوعی: تجسم.

منابع:

فیض اله زاده اردبیلی، سینا، نجفی، بهمن، و هاشمی نژاد، امیر. (۱۴۰۱).
تأثیر اتانول به‌عنوان افزودنی سوخت بیودیزل در عملکرد و
آلایندگی موتور دیزل دوگانه سوز. سوخت و احتراق، ۱۵(۳)،
۱۶۴-۱۳۹. doi: 10.22034/jfnc.2023.384795.1337

References

- Anthony, A. J., Bhojwani, U., Mittal, A., Singh, B., & Rehani, U. (2021). Life cycle assessment of biodiesel and overview of the challenges in production of the biodiesel. AIP Conference Proceedings. doi: 10.1063/5.0066771
- Ardabili, S., Mosavi, A., & Várkonyi-Kóczy, A. R. (2019). Systematic review of deep learning and machine learning models in biofuels research. International Conference on Global Research and Education. doi: 10.1007/978-3-030-36841-8_2
- Awad, M., Khanna, R., Awad, M., & Khanna, R. (2015). Support vector machines for classification. *Efficient learning machines: Theories, concepts, and applications for engineers and system designers*, 39-66. doi: 10.1007/978-1-4302-5990-9_3
- Ban-Weiss, G. A., Chen, J., Buchholz, B. A., & Dibble, R. W. (2007). A numerical investigation into the anomalous slight NOx increase when burning biodiesel; a new (old) theory. *Fuel processing technology*, 88(7), 659-667. doi: 10.1016/j.fuproc.2007.01.007
- Berlanga-Labari, C., Biezma-Moraleda, M. V., & Rivero, P. J. (2020). Corrosion of cast aluminum alloys: a review. *Metals*, 10(10), 1384. doi: 10.3390/met10101384
- Bhardwaj, M., Gupta, P., & Kumar, N. (2014). Compatibility of metals and elastomers in biodiesel: a review. *Int J Res*, 1(7), 376-391.
- Dhar, A., & Agarwal, A. K. (2014). Performance, emissions and combustion characteristics of Karanja biodiesel in a transportation engine. *Fuel*, 119, 70-80. doi: 10.1016/j.fuel.2013.11.002
- Faizollahzadeh Ardabili, S. (2021). *Improving the combustion process of biodiesel using additives*. Ardabil, Iran [In persian].
- Faizollahzadeh Ardabili, S., Najafi, B., Alizamir, M., Mosavi, A., Shamshirband, S., & Rabczuk, T. (2018). Using SVM-RSM and ELM-RSM approaches for optimizing the production process of methyl and ethyl esters. *Energies*, 11(11), 2889. doi: 10.3390/en11112889
- Falahi-Ardakani, A. (1984). Contamination of environment with heavy metals emitted from automobiles. *Ecotoxicology and environmental safety*, 8(2), 152-161. doi: 10.1016/0147-6513(84)90057-5
- Gaide, I., Grigas, A., Makareviciene, V., & Sendzikiene, E. (2024). Life cycle assessment and biodegradability of biodiesel produced using different alcohols and heterogeneous catalysts. *Green Chemistry Letters and Reviews*, 17(1). doi: 10.1080/17518253.2024.2394503
- Gao, Z., He, Y., Zhang, S., Zhang, T., & Yang, F. (2020). Research on corrosion damage evolution of aluminum alloy for aviation. *Applied Sciences*, 10(20), 7184. doi: 10.3390/app10207184
- Hashemi-Nejhad, A., Najafi, B., Ardabili, S., Jafari, G., & Mosavi, A. J. I. J. o. E. R. (2023). The Effect of Biodiesel, Ethanol, and Water on the Performance and Emissions of a Dual-Fuel Diesel Engine with Natural Gas: Sustainable Energy Production through a Life Cycle Assessment Approach. 2023. doi: 10.1155/2023/4630828
- Hashemi, F. (2021). *Modeling and investigation of the engine durability for the hybrid power generation process from the diesel engine* University of Mohaghegh Ardabili. University of Mohaghegh Ardabili.
- Hashemi, F., Pourdarbani, R., Ardabili, S., & Hernandez-Hernandez, J. L. J. A. T. A. (2023). Life Cycle Assessment of a Hybrid Self-Power Diesel Engine. 26(1), 17-28. doi: 10.2478/ata-2023-0003
- Hoang, A. T., Tabatabaei, M., Aghbashlo, M. J. E. S., Part A: Recovery, Utilization, & Effects, E. (2020). A review of the effect of biodiesel on the corrosion behavior of metals/alloys in

- diesel engines. *42*(23), 2923-2943. doi: 10.1080/15567036.2019.1623346
- Hoekman, S. K., Broch, A., Robbins, C., Cenicer, E., & Natarajan, M. (2012). Review of biodiesel composition, properties, and specifications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 16*(1), 143-169. doi: 10.1016/j.rser.2011.07.143
- Hong, J., Lee, S., Kim, J., & Yoon, J. (2012). Corrosion behaviour of copper containing low alloy steels in sulphuric acid. *Corrosion Science, 54*, 174-182. doi: 10.1016/j.corsci.2011.09.012
- Hosseiniabadi, N., Moheimani, N. R., & Javaherdashti, R. (2022). Biofuels-related materials deterioration in biorefineries, transportation and internal combustion engines: a technical review. *Corrosion Engineering, Science and Technology, 57*(2), 178-194. doi: 10.1080/1478422X.2021.2010873
- Kecman, V. (2005). Support vector machines—an introduction. In *Support vector machines: theory and applications* (pp. 1-47). doi: 10.1007/10984697_1
- Knothe, G. (2005). Dependence of biodiesel fuel properties on the structure of fatty acid alkyl esters. *Fuel processing technology, 86*(10), 1059-1070. doi: 10.1016/j.fuproc.2004.11.002
- Kurre, S. K., Pandey, S., Garg, R., & Saxena, M. (2015). Condition monitoring of a diesel engine fueled with a blend of diesel, biodiesel, and butanol using engine oil analysis. *Biofuels, 6*(3-4), 223-231. doi: 10.1080/17597269.2015.1081763
- Lapuerta, M., Armas, O., & Rodriguez-Fernandez, J. (2008). Effect of biodiesel fuels on diesel engine emissions. *Progress in Energy and Combustion Science, 34*(2), 198-223. doi: 10.1016/j.peccs.2007.07.001
- Leitao, T. E. (2007). Impact of road runoff in soil and groundwater: Portuguese and other European case-studies. *IAHS publication, 310*, 338.
- Lin, H.-T. (2005). Introduction to Support Vector Machines. *Learning System Group, California Institute of Technology*.
- Loo, D. L., Teoh, Y. H., How, H. G., Teh, J. S., Andrei, L. C., Starčević, S., & Sher, F. (2021). Applications characteristics of different biodiesel blends in modern vehicles engines: a review. *Sustainability, 13*(17), 9677. doi: 10.3390/su13179677
- Müller, G. T. (2012). Emprego da pegada hídrica e da análise de ciclo de vida para a avaliação do uso da água na cadeia produtiva do biodiesel de soja.
- Najafi, B., Faizollahzadeh Ardabili, S., Mosavi, A., Shamshirband, S., & Rabczuk, T. J. E. (2018). An intelligent artificial neural network-response surface methodology method for accessing the optimum biodiesel and diesel fuel blending conditions in a diesel engine from the viewpoint of exergy and energy analysis. *11*(4), 860. doi: 10.3390/en11040860
- Nguyen, X. P., & Vu, H. N. (2019). Corrosion of the metal parts of diesel engines in biodiesel-based fuels. *International Journal of Renewable Energy Development, 8*(2), 119. doi: 10.1063/5.0066771
- Noble, W. S. J. N. b. (2006). What is a support vector machine? , *24*(12), 1565-1567. doi: 10.1038/nbt1206-1565
- Nurrochman, A., Junianto, E., Korda, A. A., Prawara, B., & Basuki, E. A. (2023). Research hotspots and future trends of hot corrosion research: a bibliometric analysis. *RSC advances, 13*(43), 29904-29922. doi: 10.1039/D3RA04628A
- Osarolube, E., Owate, I., & Oforka, N. (2008). Corrosion behaviour of mild and high carbon steels in various acidic media. *Scientific Research and Essay, 3*(6), 224-228.
- Pandey, A. K., & Nandgaonkar, M. (2011). Experimental investigation of the effect of Esterified Karanja oil biodiesel on performance, emission and engine wear of a military 160hp Turbocharged CIDI engine. *Proceedings of the world congress on engineering*,
- Pham, M. T., Le, N. V. L., Le, H. C., Truong, T. H., & Cao, D. N. (2023). A comprehensive review on the use of biodiesel for diesel engines. *International Journal of Renewable Energy Development, 12*(4), 720-740.
- Popov, B. N. (2015). *Corrosion engineering: principles and solved problems*. Elsevier. 0444627278.
- Pradhan, A. (2012). Support vector machine-a survey. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering, 2*(8), 82-85.
- Rajaeifar, M. A., Tabatabaei, M., Aghbashlo, M., Hemayati, S. S., & Heijungs, R. (2019). Biodiesel production and consumption: Life Cycle Assessment (LCA) approach. *Biodiesel: From Production to Combustion, 161-192*. doi: 10.1007/978-3-030-00985-4_8
- Suthaharan, S., & Suthaharan, S. (2016). Support vector machine. *Machine learning models and algorithms for big data classification: thinking with examples for effective learning*, 207-235.

- doi: 10.1007/978-1-4899-7641-3_9
- van Wijnen, J., Ivens, W. P., Kroeze, C., & Löhr, A. J. (2015). Coastal eutrophication in Europe caused by production of energy crops. *Science of The Total Environment*, 511, 101-111.
- doi: 10.1016/j.scitotenv.2014.12.032
- Warmate, A., Ideriah, T., Tamunobereton, I., Udonam, U., & Ibaraye, T. (2011). Concentrations of heavy metals in soil and water receiving used engine oil in Port Harcourt, Nigeria. *Journal of Ecology and the Natural Environment*, 3(2), 54-57.
- Xing, A., Ma, J., Zhang, Y., Wang, Y., & Jin, Y. (2010). Life cycle assessment of biodiesel environmental effects. *Journal of Tsinghua University Science and Technology*, 50(6), 917-922.
- Yeşilyurt, M. K., Öner, İ. V., & Yılmaz, E. Ç. (2019). Biodiesel induced corrosion and degradation. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 25(1), 60-70.