

تحلیل بازده اکسرژی حاصل از احتراق افزودنی سولکتال-استین به سوخت بنزین در موتور بنزینی

جواد طریقی^{۱*}، محمد حسنی^۲ و علی حاجی احمد^۳

چکیده

آلودگی هوای شهری ناشی از استفاده خودروها با موتور اشتعال جرقه‌ای است که عمدتاً از سوخت بنزین بهره می‌گیرند؛ که این امر سبب کاهش میزان ذخایر سوخت‌های فسیلی، افزایش آلودگی‌های حاصله از احتراق، بیماری‌های تنفسی می‌شود. افزودن ترکیباتی که بر پایه سوخت‌های زیستی هستند یکی از گزینه‌های موجود در جهت کاهش آلاینده‌های حاصل از احتراق است. گلیسرین محصول جانبی فرآیند تولید سوخت بیودیزل و به‌عنوان یک عامل محدود کننده در تولید این ترکیب افزودنی (بیودیزل) است. در این پژوهش با تبدیل گلیسرین حاصل از روغن آفتابگردان به ماده سولکتال استین، در کنار ترکیب آن با سوخت بنزین ترکیب منحصری از سوخت‌های زیستی ایجاد گردید. این نوع سوخت رفتارهای بهینه‌ای در بعضی از درصدهای ترکیبی از خود بروز داد. از ترکیب افزودنی سولکتال استین در ترکیب با سوخت بنزین جهت ارزیابی در موتورسیکلت ۱۵۰ سی‌سی تحت بارهای ۱/۲، ۶/۲ و ۱۱/۲ نیوتن-متر و سرعت‌های ۵۷۰، ۸۵۰، ۱۰۴۴، ۱۲۶۹ و ۱۴۲۷ دور بر دقیقه، بر روی میزان بازده اکسرژی سوخت وارد شده به اکسرژی کار خالص مورد آزمایش و بررسی قرار گرفت. در بار اعمالی ۱۱/۲ نیوتن-متر با سرعت‌های ۱۲۶۹ و ۱۴۲۷ دور بر دقیقه به دلیل بار وارد شده بیش از حد و عدم توانایی سوخت منجر به خاموشی موتور در کلیه سوخت‌های تزریقی به آن شد. نتایج نشان داد که افزودن ترکیب‌های سه‌گانه به سوخت بنزین باعث افزایش اکسرژی توان ترمزی به دلیل بالا بودن سطح چگالی ترکیب‌ها گردید.

واژه‌های کلیدی: سوخت زیستی، سوخت‌های ترکیبی، اکسرژی سوخت، اکسرژی کار خالص، عملکرد موتور.

ارجاع: طریقی ج، حسنی م، و حاجی احمد ع. ۱۴۰۳. تحلیل بازده اکسرژی حاصل از احتراق افزودنی سولکتال-استین به سوخت بنزین در موتور بنزینی نشریه پژوهش‌های مکانیک ماشین‌های کشاورزی. ۳۳: ۶۵-۷۴. <https://dx.doi.org/10.22034/JRMAM.2024.14769.710>

۱- دانشیار گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه محقق اردبیلی.

۲- دانشجو دکتری انرژی‌های تجدیدپذیر، گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه محقق اردبیلی.

۳- استادیار گروه مهندسی ماشین‌های کشاورزی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران.

* نویسنده مسئول: Tarighi@uma.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۴/۲۹

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۳/۱۸

مقدمه

یکی از روش‌های مرسوم برای ارزیابی فرآیند شیمیایی یا فیزیکی از دیدگاه انرژی، نوشتن معادله موازنه انرژی آن فرآیند بر اساس قانون اول ترمودینامیک در جهت کاهش اتلاف حرارتی یا بالا بردن بازده حرارتی فرآیند است. تحلیل اکسرژی روشی است که در آن تلفات ترمودینامیکی بر اساس قانون‌های اول و دوم ترمودینامیک برآورد می‌شود که کاربرد این روش گویای محل اتلاف انرژی فرآیند حاصل شده است. از سوی دیگر بررسی قانون اول ترمودینامیک که مدل‌سازی سامانه موتور را بیان می‌کند (Rakopoulos & Giakoumis, 2006). ادغام قانون دوم با قانون اول ترمودینامیک سبب می‌گردد تا بتوانیم با درصد اطمینان نزدیک به واقعیت بیان داریم که در کدام نقاط فرآیند انرژی مفید از بین می‌رود. ارزیابی انرژی مفید، بالاترین عملکرد ممکن یک فرآیند ترمودینامیکی را تعیین می‌کند که این یافته‌ها در کاهش اتلاف انرژی و در راستای بهبود عملکرد موتور از نظر بازدهی و توان خروجی است (Caton, 2000). مهم‌ترین منظر استفاده از سوخت‌های فسیلی در موتورهای درون‌سوز، بحث تأمین انرژی مورد نیاز و توان موتورها است. اصلی‌ترین منبع آلودگی هوا مراکز شهری موتورهای درون‌سوز است. منابع سوخت‌های فسیلی در جهان روبه اتمام است و بنابراین مطالعات گسترده‌ای در جهت بهره‌گیری، استفاده از سوخت‌های جایگزین و تجدید پذیر در حال انجام است که بتواند بازده انرژی و اکسرژی موتورهای داخلی را که با سوخت‌های جایگزین تغذیه می‌شوند تأمین نماید (Rosen *et al.*, 2007). تجزیه و تحلیل اکسرژی یک ابزار مفید برای تحلیل و بررسی ویژگی‌های عملکردی موتور است. با استفاده از این ابزار و رویکرد تحلیلی می‌توان با مشخص کردن نوع، مکان و میزان تلفات انرژی در قسمت‌های مختلف موتور، اقدامات لازم برای کاهش تلفات در بخش‌های مختلف موتور را انجام داد و با بهبود نقص ترمودینامیکی سامانه موجود به سمت طراحی سامانه‌های جدید و بهینه قدم برداشت. در بررسی که بر روی مقایسه اکسرژی عملکرد یک موتور احتراق داخلی با احتراق جرقه برای سوخت‌های بنزین، هیدروژن و متان در نظر گرفته شده است. بدین‌منظور ابتدا مدل‌سازی چند ناحیه‌ای موتور بر اساس پیشروی شعله معرفی شده و سپس با تعریف واژه اکسرژی و ایجاد معادلات تعادل اکسرژی

مربوطه و اعمال آن بر روی سامانه‌های بسته و حجم‌های پایش، مبانی مفهومی لازم برای انجام تحلیل اکسرژی سامانه ایجاد شد. این مطالعه نشان داد که بیشترین سهم برگشت ناپذیری در موتور مربوط به فرآیند احتراق است. همچنین برای شرایط استوکیومتری می‌توان به درصد اکسرژی منتقل شده با کار تقریباً برابر برای هر سه سوخت، بیشترین درصد برگشت‌ناپذیری برای بنزین و کمترین درصد برگشت‌ناپذیری برای هیدروژن اشاره کرد. بررسی نتایج تحلیل اکسرژی در شرایط عملیاتی موتور نشان داد که افزایش دور موتور باعث افزایش انتقال اکسرژی به کار و کاهش انتقال اکسرژی به گرما می‌شود. همچنین افزایش نسبت هم ارزی باعث افزایش سهم اکسرژی مخلوط در داخل سیلندر و کاهش سهم برگشت‌ناپذیر اکسرژی ورودی می‌شود (Norouzi *et al.*, 2021).

در پژوهشی تجزیه و تحلیل اکسرژی در یک موتور احتراق تراکمی تک سیلندر که به موتور احتراق جرقه‌ای با نسبت تراکم متفاوت تبدیل شده است مورد بررسی قرار گرفت. این موتور هم با ترکیبات دیزل، اتانول و بنزین - اتانول کار می‌کرد. آزمایش‌ها بر روی موتور بدون تغییر انجام شد و دیزل با نسبت تراکم ۱۷:۱ کار می‌کرد و با ۵۰ و ۱۰ درصد حجمی اتانول در مخلوط بنزین - اتانول و اتانول خالص در نسبت تراکم ۱۲:۱ و ۹:۱ در چرخش به احتراق جرقه تبدیل شد. سرعت‌های کارکرد موتور ۲۶۰۰، ۲۱۰۰، ۱۵۰۰ و ۳۲۰۰ دور در دقیقه بود. در شرایط عملیاتی آزمایشی، نتایج موتور اصلاح شده نشان داد که ترکیب ۵۰ درصد اتانول - بنزین و اتانول با نسبت تراکم ۱۲:۱ بازدهی اکسرژی و ضریب اثر محیطی عملکرد بهتری از خود به نمایش می‌گذارد. علاوه بر این، موتور با احتراق جرقه‌ای که با ترکیبات اتانول و بنزین - اتانول کار می‌کرد، عملکرد بهتری را نشان داد (Zapata *et al.*, 2020).

در پژوهشی تجزیه و تحلیل انرژی و اکسرژی موتور احتراق جرقه‌ای با ترکیبات سوخت بنزین- اتانول، بنزین- بوتانول و بنزین- بوتانول - اتانول مورد بررسی قرار گرفته است. تجزیه و تحلیل بر اساس داده‌های تجربی در سرعت‌های مختلف موتور انجام شده است. با این داده‌ها، مقایسه‌ای برای تجزیه و تحلیل انرژی و اکسرژی بین ترکیبات سوخت استفاده شده انجام شد. مشخص شد که

احتراق در موتورهای SI مورد بررسی قرار گرفت. بررسی‌ها روی موتورهای مختلف، شرایط عملیاتی و نرخ‌های ترکیب سوخت با سرعت‌های مختلف موتور انجام شد. اکثر نتایج نشان داد که اتانول-بنزین در مقایسه با متانول-بنزین از نظر انتشار گازهای خروجی، قدرت موتور و گشتاور خروجی به‌ویژه در دور موتور پایین دارای مزایای بیشتری است. در مورد ترکیب اتانول-بنزین مقدار NO_x معمولاً با افزایش بار وارد بر موتور بالا رفته است. همچنین نشان داده شد که ترکیب متانول-بنزین بالاترین افزایش را در توان ترمزی (تقریباً ۳۰٪) در بارهای بیشینه موتور داشته است. این مطالعه به‌طور کلی نشان داد که اهمیت افزودن اتانول یا متانول به بنزین باعث کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای از موتور و افزایش بازدهی می‌شود و این تأثیرات با تغییر نسبت ترکیب تغییر می‌کند (Yusuf & Inambao, 2021).

در پژوهشی به تبدیل (یک محصول جانبی بیودیزل به تری استین و استفاده بیشتر از آن به‌عنوان یک افزودنی سوخت برای موتور احتراق جرقه‌ای پرداخته شد. در این مطالعه سوخت‌های آزمایشی حاوی مخلوط‌های مختلف بنزین، متانول و تری‌استین تهیه و با بنزین خالص مقایسه شدند. روش چند هدفه مبتنی بر روش سطح پاسخ (RSM) برای بهینه‌سازی عامل‌های خروجی موتور مانند انتشار NO_x ، HC، CO_2 ، CO، BTE انتخاب شد. نتایج نشان داد که موتوری با توان ترمزی ۱/۱۷ کیلووات کار می‌کند و حاوی ۹۰/۷۳٪ بنزین، ۴/۹۴٪ متانول و ۴/۳۱٪ تری استین (بر اساس حجم) است. دارای ترکیب عامل‌های ورودی بهینه بود. لذا بر طبق آن حداکثر BTE و کمتری «آلایندگی اگزوز موتور را نشان داده است. (Tomar et al., 2021).

در پژوهشی اثرات افزودن ترکیبات اتانول و گلیسرول بر روی یک موتور رفت و برگشتی اشتعال جرقه‌ای بررسی شد. سوخت پیشنهادی منشأ کاملاً تجدیدپذیر مبتنی بر اتانول و گلیسرول با نسبت ۳:۱ (۷۵٪ و ۲۵٪) بوده است. تجزیه و تحلیل احتراق ترکیب اتانول-گلیسرول در موتور مورد مطالعه، بر روی ترمودینامیک احتراق و میزان آلاینده‌ها در گازهای خروجی متمرکز بود. این تجزیه و تحلیل به‌عنوان یک تجزیه و تحلیل مقایسه‌ای با بنزین و اتانول انجام شد که به‌عنوان سوخت مرجع در نظر گرفته شدند. انتشار

در مقایسه با اتانول-بنزین، بوتانول-بنزین دارای بالاترین توان ترمزی، تلفات اکسرژی از طریق انتقال حرارت و گازهای خروجی، بازدهی حرارتی ترمز و بازدهی اکسرژی است. در مقابل، تخریب اکسرژی زمانی که موتور با سوخت بوتانول-بنزین کار می‌کند مقادیر پایینی را دارد و در مقابل، بالاترین مقادیر را هنگامی که با اتانول-بنزین کار می‌کند، ارائه می‌دهد. علاوه بر این، مقدار میانگینی برای توان ترمزی، تلفات اکسرژی از طریق انتقال حرارت و گازهای خروجی، تخریب اکسرژی، حرارت ترمز و بازدهی اکسرژی توسط ترکیب اتانول-بوتانول-بنزین ارائه شد. نتایج یافته‌های تحلیل اکسرژی نشان داد که بوتانول-بنزین می‌تواند یک جایگزین رقابتی بجای سوخت اتانول-بنزین در موتورهای جرقه زن ارائه دهد، زیرا از نظر توزیع انرژی و اکسرژی به بنزین نزدیک‌ترین است (Nazal & Kamil, 2020).

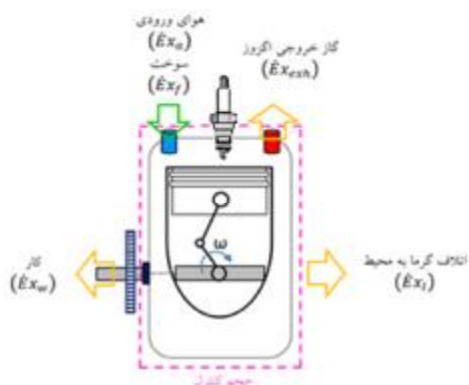
تحلیل عملکرد اکسرژی یک موتور دیزل سوخت رسانی شده با مخلوط‌های دیزل - بیودیزل (با غلظت ۵ درصد حجمی) حاوی مقادیر مختلف پلی استایرن (۰، ۲۰، ۵۰، ۷۰ گرم) تحت سرعت و بار مختلف موتور مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج حاصل از انجام پژوهش نشان داد که متغیرهای اکسرژی به شدت به سرعت و بار موتور بستگی دارد. به‌طور کلی، افزایش سرعت موتور موجب کاهش کارایی اکسرژی و شاخص پایداری موتور دیزل گردیده است. با این حال، با افزایش بار موتور در ابتدا، افزایش کارایی اکسرژی و شاخص پایداری مشاهده شده است. بیش‌ترین کارایی اکسرژی و شاخص پایداری موتور دیزل هنگام استفاده از ۵۰ گرم پلی استایرن بر لیتر بیودیزل به دست آمد (Aghbashlo et al., 2015).

با توجه ویژه به اهداف مطالعه و بررسی منابع دیگر اصلی‌ترین تفاوت مطالعه و تحقیق پیش رو با سایر پژوهش‌ها، استفاده از افزودنی‌های مشتقی از گلیسرول سولکتال استین در ۳ سطح ۵٪، ۱۰٪، ۱۵٪ در بارهای وارد بر موتور تحت آزمون ۱/۲، ۶/۲، ۱۱/۲ نیوتن‌متر و در ۵ سطح سرعتی از جعبه دنده (۱۴۲۷، ۱۲۶۹، ۱۰۴۴، ۸۵۰، ۵۷۰ دور بر دقیقه) به همراه تجزیه و تحلیل بازده اکسرژی سوخت وارده به اکسرژی کار خالص، بر روی احتراق موتور بنزینی بدون حضور اتانول است. در مطالعه‌ای مروری اثرات ترکیب سوخت اتانول-بنزین و متانول-بنزین بر عملکرد، انتشار و برخی ویژگی‌های

§ هوای ورودی به عنوان مخلوطی از گازهای

§ ایده آل فرض شده است.

به علت آنکه تغییرات اکسرژی جنبشی و پتانسیل اندک است از آن‌ها صرف نظر شده است.



شکل ۱- جریان‌های ورودی و خروجی برای تحلیل اکسرژی موتور بنزینی

برای نرخ اکسرژی ورودی به حجم پایش، اکسرژی شیمیایی سوخت و همچنین اکسرژی شیمیایی هوا در نظر گرفته شده است. نرخ اکسرژی هوای ورودی به یک موتور احتراق داخلی را می‌توان با استفاده از معادله (۱) نشان داد.

$$\dot{E}x_a = \dot{m}_a \left[C_{p,a} \left(T_a - T_0 - T_0 \ln \left(\frac{T_a}{T_0} \right) \right) + RT_0 \ln \left(\frac{P_a}{P_0} \right) \right] \quad (1)$$

که در آن:

$\dot{E}x_a$: نرخ اکسرژی هوای ورودی برحسب کیلووات؛
 $\dot{m}_a$: نرخ جریان جرمی هوا برحسب کیلوگرم بر ثانیه؛
 $C_{p,a}$: ظرفیت گرمایی ویژه هوای ورودی برحسب کیلوگرم بر ثانیه؛

T_a : دمای هوای ورودی برحسب کلوین؛

T_0 : دمای مرجع که مقدار آن ۱۵ درجه سلسیوس؛

P_a : فشار هوای ورودی برحسب کیلو پاسکال؛

P_0 : فشار مرجع که برابر ۱۰۰ کیلو پاسکال؛

R : ثابت گاز که مقدار آن برابر ۰/۲۸۷ کیلوژول بر کیلوگرم کلوین است.

از طرفی دیگر ظرفیت گرمایی ویژه هوا که به صورت تابعی از دما است، از معادله (۲) محاسبه می‌شود (Aghbashlo et al., 2015).

آلاینده‌های CO ، NO_x و هیدروکربن‌های نسوخته (UHC) تفاوت قابل توجهی با آزمایش‌های انتشار بنزین نداشت. عملکرد موتور بیان شده با فشار مؤثر میانگین اندیکه (IMEP) نشان داده شده کمتر از ۳٪ و همچنین بازدهی حرارتی در حدود ۴٪ نسبت به سوخت اتانول کاهش یافت. در ادامه نشان داده شد که میزان آلاینده‌ها در گازها در حدود سوخت بنزین بود و با وجود آن میزان CO منتشر شده کمتر بود لذا نتیجه گرفته شد که ترکیب اتانول-گلیسرول در نسبت ۳:۱ می‌تواند به طور مستقیم به عنوان سوخت جایگزین برای بنزین یا اتانول در موتورهای احتراق داخلی در صنعت خودرو و نیرو استفاده شود (Szwaja et al., 2022).

سولکتال-استین ارزش حرارتی کمتری نسبت به E20 دارد که عمدتاً به علت اکسیژن ساختاری آن است. با این حال محتوای اکسیژن می‌تواند روند احتراق را بهبود ببخشد و ارزش حرارتی پایین آن را جبران کند. به طور کلی این رفتار در نرخ اکسرژی گازهای خروجی به وضعیت احتراق مربوط می‌شود، یعنی این که آیا در حال بهبود یا بدتر شدن است. با افزایش مقدار بار وارد شده بر موتور اکسرژی کار مفید (نرخ تبدیل سوخت به کار مفید) افزایش می‌یابد. با بالا رفتن بار موتور دمای درون سیلندر موتور افزایش یافته و در نتیجه عملکرد احتراق بهبود می‌یابد (Akbiyik et al., 2023).

مواد و روش

تحلیل اکسرژی

به میزان کار قابل استخراج از یک سامانه که طی فرآیندی برگشت پذیر به حالت تعادل ترمودینامیکی خود رسیده است، اکسرژی گفته می‌شود. یا به عبارت دیگر اکسرژی اصطلاحی ترمودینامیکی است که به بیشینه کار مفیدی که در یک فرایند رسیدن به تبادل ترمودینامیکی می‌توان از سامانه دریافت کرد؛ بنابراین بهبود کارایی و کاهش تلفات سامانه را می‌توان با تجزیه و تحلیل رویکرد اکسرژی یک سامانه ترمودینامیکی تعیین کرد.

در این مطالعه فرضیات زیر در نظر گرفته شده است:

§ موتور به عنوان یک حجم پایش با فرض عملکرد

پایدار در نظر گرفته شده است.

§ موتور در حالت ایستا در نظر گرفته شده است.

$$\varphi = 1/0401 + 0/1728 \left(\frac{H}{C}\right) + 0/0432 \left(\frac{O}{C}\right) + 0/2169 \left(\frac{S}{C}\right) \times \left(1 - 2/0268 \left(\frac{H}{C}\right)\right) \quad (5)$$

که در آن C, H, O و S به ترتیب کسر جرمی هر یک از عناصر هیدروژن، کربن، اکسیژن و محتوای گوگرد سوخت است.

ارزش حرارتی سوخت با استفاده از معادله (۶) به دست آمده است.

$$q_{LHV} = \sum X_i q_{LHV,i} \quad (6)$$

که در این معادله:

X_i : کسر جرمی (بدون بعد)؛

$q_{LHV,i}$: ارزش حرارتی پایین هر مؤلفه (kJ/kg) است.

تجزیه و تحلیل رویکرد اکسرژی ابزاری محبوب برای حل مشکلات مرتبط با کاربرد گسترده منابع انرژی و نگرانی زیست محیطی آنهاست. علاوه بر این اکسرژی به عنوان یک ابزار منحصر به فرد برای طراحی تجزیه و تحلیل بهینه‌سازی و مقاوم‌سازی عملیات واحدهای انرژی بر ظاهر شده است. در نتیجه، تجزیه و تحلیل اکسرژی می‌تواند به نتایج معنی‌داری در مقایسه با تجزیه و تحلیل انرژی معمولی منجر شود. علاوه بر این می‌تواند درک عمیقی از عملکرد واقعی و ایده‌آل یک سامانه معین را ارائه دهد (Aghbashlo et al., 2015).

$$C_{P,a} = 1/04841 - 0/0003837T_a + \frac{9/45378T_a^2}{10^7} - \frac{5/49031T_a^2}{10^{10}} + \frac{7/92981T_a^2}{10^{14}} \quad (2)$$

نرخ اکسرژی سوخت وارد شده به حجم پایش فقط اکسرژی شیمیایی سوخت و از معادله (۳) قابل محاسبه است (Caliskan et al., 2009).

$$\dot{E}x_f = \dot{m}_f \varepsilon_f \quad (3)$$

که در این معادله:

$\dot{E}x_f$: نرخ اکسرژی سوخت (kJ)؛

$\dot{m}_f$: نرخ سوخت مصرفی (kg/s)؛

ε_f : اکسرژی ویژه سوخت (kJ/kg) است.

برای محاسبه اکسرژی ویژه سوخت از معادله (۴) استفاده شده است (López et al., 2014- Şanlı & Uludamar, 2019).

$$\varepsilon_f = \varphi q_{LHV} \quad (4)$$

که در این معادله:

φ : ضریب اکسرژی شیمیایی (بدون بعد)؛

q_{LHV} : ارزش حرارتی پایین سوخت (kJ/kg) است.

ضریب اکسرژی شیمیایی سوخت‌های استفاده شده در این پژوهش از معادله (۵) است (Cavalcanti, 2019- Imdadul et al., 2015).

جدول ۱- مشخصات فیزیکی و شیمیایی سوخت

سوخت	ارزش حرارتی پایین (kJ/kg)	اکسرژی شیمیایی (kJ/kg)	کربن (%)	هیدروژن (%)	اکسیژن (%)	Flash point
بنزین	۴۳۴۰۰	۴۶۵۵۶	۸۴/۱۲	۱۵/۸۸	--	-۴۳
بنزین+۵% سولکتال استین	۴۰۱۶۰	۴۳۱۸۳	۷۷/۷۰	۱۵/۳۶	۶/۹۴	-۳۱/۱
بنزین+۱۰% سولکتال استین	۳۹۵۱۱	۴۲۵۰۳	۷۶/۸۸	۱۵/۱۹	۷/۹۳	-۲۸/۷
بنزین+۲۰% سولکتال استین	۳۸۸۶۲	۴۱۸۲۳	۷۵/۰۸	۱۴/۸۵	۱۰/۰۷	-۲۶/۴

کار خالص حجم پایش با استفاده از معادله (۸) محاسبه می‌گردد.

$$W = \frac{2\pi NT}{60000} \quad (8)$$

که در این معادله:

N : تعداد چرخش دور شفت؛

T : مدت زمان بر حسب ثانیه است.

بازده اکسرژی های مورد بحث این پژوهش از معادله (۹) محاسبه می‌شود.

نرخ اکسرژی توان ترمزی تولید شده برابر با نرخ انرژی خالص است که با استفاده از معادله (۷) تعریف شده است.

$$\dot{E}x_w = \dot{W} \quad (7)$$

که در این معادله:

$\dot{E}x_w$: نرخ اکسرژی توان ترمزی بر حسب کیلووات؛

$\dot{W}$: نرخ اکسرژی کار خالص بر حسب کیلووات است.

$$BEE = \frac{\dot{E}_{xw}}{\dot{E}_{xf}} \quad (9)$$

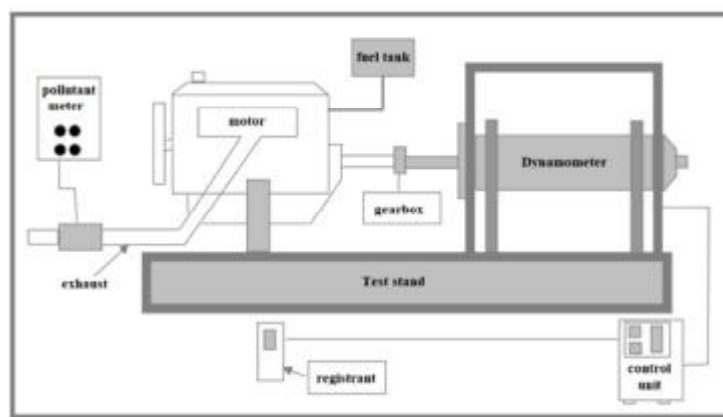
جدول ۲- مشخصات فنی موتورسیکلت ۱۵۰ سی سی کویر

مدل موتور	تک سیلندر، چهارزمانه
کارخانه سازنده	شرکت کویر موتور
حجم موتور	۱۵۰ سی سی
توان	۸/۴۷ کیلووات در ۸۴۹۵ دور بر دقیقه
سامانه خنک کاری	هوا خنک
سامانه روان کاری	روغن موتور (ویل پمپ)
سامانه جرقه زنی	CDI
سامانه انتقال قدرت	۵ سرعت (دنده)

مواد و روش‌ها

خصوصیات موتور تحت آزمون

موتور تحت آزمون یک موتور چهارزمانه ۱۵۰ cc است که اغلب در صنعت موتورسیکلت سازی کاربرد دارد. ضمناً نحوه ترکیب سوخت و سوخت رسانی موتور موردنظر از نوع کاربراتور بوده است. مشخصات فنی موتورسیکلت مورد آزمون در جدول ۲ آورده شده است.



شکل ۲- شماتیک کلی موتور تحت آزمون

طراحی آزمایش

متغیرهای تحت پایش بار اعمال شده از ۱/۲ نیوتن متر الی ۱۱/۲ نیوتن متر از طرف دینامومتر، سرعت شفت خروجی از ۵۷۰ دور بر دقیقه الی ۱۴۲۷ دور بر دقیقه و نوع سوخت بنزین و ترکیب های مختلف بنزین- سولکتال استین است.

در این پژوهش به دلیل زمان بر بودن آزمایشات از روش سطح پاسخ که یکی از روش های طراحی آزمایشات است استفاده شد. در همین راستا از نرم افزار Design-Expert نسخه 13.0.5 جهت تجزیه تحلیل داده ها، رسم نمودارها و شکل های گرافیکی استفاده گردید.

ارزیابی

جهت بررسی عامل های عملکردی موتور، با مخلوط سوخت بنزین با سولکتال-استین از سه سطح ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد، به موتور تحت آزمون که در دانشکده کشاورزی دانشگاه تهران واقع در کرج بود تزریق گردید. آزمایش ها برای هر نمونه ترکیب سوختی، در ۳ سطح از گشتاور خروجی (۱/۲ و ۶/۲ و ۱۱/۲ نیوتن متر) و در ۵ سطح سرعت دورانی محور خروجی جعبه دنده (۵۷۰، ۸۵۰، ۱۰۴۴، ۱۲۶۹، ۱۴۲۷ دور بر دقیقه) یا به عبارت دیگر در ۵ دنده موتور با دور موتور ثابت ۲۵۰۰ rpm انجام شد. سوخت بنزین مورد استفاده از جایگاه سوخت محلی تأمین گردید.

جدول ۳- طراحی آزمایش ها

ردیف	عامل	۱	۲	۳	۴	۵
۱	سرعت	۵۷۰	۸۵۰	۱۰۴۴	۱۲۶۹	۱۴۲۷
۲	بار (N.m)	۱/۲	۶/۲	۱۱/۲	-	-
۳	سوخت	بنزین	بنزین+۵% سولکتال استین	بنزین+۱۰% سولکتال استین	بنزین+۱۵% سولکتال استین	-

می‌کنید کلیه ضرایب معنادار بوده است. کلیه جملات درجه دوم قادرند با خطای کمتر از ۰/۰۵ تغییرات بازده اکسرژی را پیش‌بینی کنند و با یک تأثیر معکوس بر روی بازده اکسرژی وارد مدل پیش‌بینی شوند. از میان عبارات متقابل، بین متغیرهای سرعت و بار، رابطه معناداری وجود دارد به‌گونه‌ای که اثر متقابل این متغیرها بر روی هم رابطه مستقیم و هم سویی با بازده اکسرژی مورد بحث این پژوهش دارد. ضرایب جملات دیگر به دلیل اینکه P-value آنها بزرگ‌تر از ۰/۰۵ است از دید آماری معنادار نبود، بنابراین وارد مدل مذکور نشدند.

معادله مدلی که از طرح برای پاسخ‌ها به دست خواهد آمد از معادله (۱۰) است (Castillo, 2007).

$$y = a_0 + \sum_{i=1}^3 a_i x_i + \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1, j \neq i}^3 a_{ij} x_i x_j \quad (10)$$

که در آن y بازده اکسرژی مورد بحث، x_i و x_j متغیرهای مستقل و a_j, a_i, a_0 ضرایب مدل هستند.

نتایج و بحث

در جدول ۴ نتایج تحلیل واریانس ضرایب مختلف عبارات خطی، درجه دوم و اثر متقابل، مورد بررسی قرار گرفته است؛ به‌گونه‌ای که ضرایب آماری معنادار باشند (در سطح ۵ درصد). همان‌طور که در جدول مشاهده

جدول ۴ - تجزیه تحلیل واریانس بازده اکسرژی

منبع	جمع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	F-value	p-value
مدل	۱۵۲۱/۶۴	۹	۱۶۹/۰۷	۲۴۷/۷۴	۰/۰۰۰۱<
درصد (A)	۰/۳۵	۱	۰/۳۵	۰/۵۱۲۹	۰/۰۴۷۷۸
گشتاور (B)	۱۱۲۶/۲۷	۱	۱۱۲۶/۲۷	۱۶۵۰/۳	۰/۰۰۰۱<
سرعت (C)	۲۵۰/۹۳	۱	۲۵۰/۹۳	۳۶۷/۶۸	۰/۰۰۰۱<
AB	۰/۷۷۹۷	۱	۰/۷۷۹۷	۱/۱۴	۰/۰۲۹۱۲
AC	۰/۷۱۳۹	۱	۰/۷۱۳۹	۱/۰۵	۰/۰۳۱۲۳
BC	۷۳/۵۲	۱	۷۳/۵۲	۱۰۷/۷۲	۰/۰۰۰۱<
A ²	۴/۵۰	۱	۴/۵۰	۶/۶	۰/۰۱۳۹
B ²	۲۰/۳۵	۱	۲۰/۳۵	۲۹/۸۲	۰/۰۰۰۱<
C ²	۰/۰۲۸۱	۱	۰/۰۲۸۱	۰/۰۴۱۲	۰/۰۰۰۱<
باقی‌مانده	۲۸/۶۶	۴۲	۰/۶۸۲۵	-	-
Cor Total	۱۵۵۰/۳۰	۵۱	-	-	-

به نمودارها، با افزایش بار، بازده اکسرژی نیز افزایش می‌یابد. یکی از علل افزایش که می‌توان به آن اشاره نمود این است که با افزایش بار وارده بر موتور تحت آزمون، توان ترمزی نیز افزایش می‌یابد. همچنین بازده اکسرژی رابطه مستقیم با توان ترمزی سامانه تحت آزمون دارد، بنابراین بازده اکسرژی مورد بحث افزایش می‌یابد. با افزایش بار وارده بر موتور، میزان مصرف سوخت موتور نیز بیش‌تر می‌گردد ولی از سوی دیگر میزان توان ترمزی موتور بیش‌تر از میزان افزایش مصرف سوخت موتور است. از جهت دیگر با افزایش بار وارده بر موتور، دمای محفظه احتراق سوخت نیز افزایش می‌یابد و همچنین موجب افزایش فشار درون سیلندر موتور می‌گردد. با افزایش سرعت موتور بازده اکسرژی تحت تمام شرایط کاری افزایشی است (Hulwan & Joshi, 2011 – Canakci & Hosoz, 2006).

مقادیر R^2 اصلی، R^2 تنظیم‌شده و R^2 پیش‌بینی شده برحسب درصد به ترتیب برابر ۹۸/۱۵٪، ۹۷/۷۵٪ و ۹۶/۹۶٪ است که بیان‌گر همبستگی بالا مابین مقادیر تجربی و پیش‌بینی شده بازده اکسرژی است. مدل پیش‌بینی قادر است ۸۲/۶۱ درصد کل تغییرات بازده اکسرژی را در شرایط مورد آزمایش تشریح و پیش‌بینی کند. معادله به‌دست آمده برای مقدار اکسرژی سولکتال-استین با بنزین برابر است با:

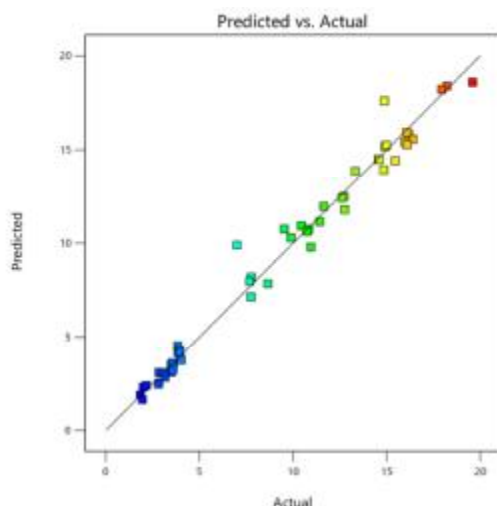
$$\text{Exergy Fuel} = -0/35877 + 0/1248P + 0/85192T + 0/00088S + 0/05877P \cdot T + 0/00007P \cdot S + 0/0013390T \cdot S - 0/01176P^2 - 0/05739T^2 - 3/16235E - 7S^2$$

که در آن، P: درصد ماده؛ T: گشتاور یا نیرو وارده بر موتور (N.m)؛ S: سرعت (RPM)؛ E: خطای سامانه است.

شکل ۳ رابطه بین بار وارده بر موتور و سرعت موتور را به‌صورت نمودار کانتور و رویه برای افزودنی ۵٪ سولکتال-استین با سوخت بنزین را نشان می‌دهد. با توجه

نمودار شکل ۴، اثر تمامی متغیرها را در نقطه مرکزی نمایش می‌دهد.

با توجه به نمودار ۵، مقادیر اندازه‌گیری در آزمایش تقریباً با پیش‌بینی نرم‌افزار مطابقت دارد و این بیان‌گر مقادیر صحیح داده‌های اندازه‌گیری شده (تجربی) است.



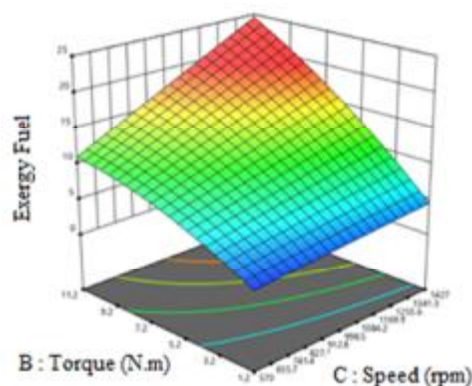
شکل ۵- نمودار پیش‌بینی و داده‌های تجربی آزمون بازده اکسرژی

نتیجه‌گیری

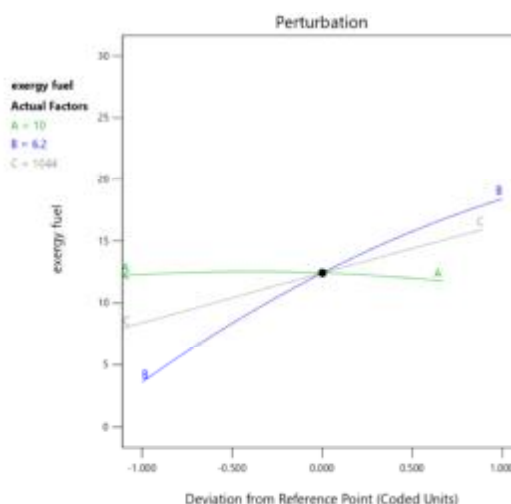
در این مطالعه، میزان R^2 (ضریب تبیین) پیش‌بینی‌شده برابر ۹۶/۹۶ درصد و R^2 تعدیل‌شده برابر ۹۷/۷۵ درصد به دست آمد. هرچه مقادیر به دست آمده به مقدار ۱ نزدیک باشد بیان‌گر مطابقت بالای نتایج حاصل از مدل با نتایج واقعی است.

افزایش غلظت افزودنی سولکتال - استین به سوخت بنزین سبب بهبود احتراق سوخت می‌گردد. دلیل این امر را می‌توان به اکسیژن موجود در مخلوط اکسیژن‌دار (سولکتال-استین) دانست. با ازدیاد درصد افزودنی در سوخت بنزین، بازده اکسرژی نیز افزایش پیدا کرد. دلیل این امر را باید به خاطر بهبود یافتن شرایط احتراق به‌واسطه افزایش میزان اکسیژن موجود در افزودنی دانست. با افزایش سرعت دور خروجی از جعبه دنده و بار وارد شده بر موتور، شاهد افزایش بازده اکسرژی هستیم. افزودن ترکیبات به دلیل بالا بودن سطح چگالی و وجود اکسیژن در ساختار مولکولی ترکیب با سوخت بنزین باعث افزایش اکسرژی می‌گردد. اساساً بالا بودن نرخ چگالی باعث می‌شود که سوخت بیش‌تری به درون محفظه

تأثیر سوخت سولکتال-استین به همراه بنزین بر روی اکسرژی مورد نظر به گونه ایست که با افزایش غلظت افزودنی بازده اکسرژی افزایش می‌یابد. دلیل این امر ممکن است به خاطر بهبود شرایط احتراق به واسطه افزایش میزان اکسیژن موجود در مخلوط سوخت باشد. از آنجایی‌که بازده اکسرژی رابطه عکسی با میزان مصرف سوخت و ارزش حرارتی آن دارد، بنابراین مصرف ویژه سوخت و ارزش حرارتی افزودنی‌ها به‌طور مستقیم بر روی بازده اکسرژی تأثیر می‌گذارد. از طرف دیگر افزایش چگالی و ارزش حرارتی پایین افزودنی‌ها در مقایسه با سوخت بنزین باعث افت اندک بازده اکسرژی خواهد شد.



شکل ۳- نمودار کانتور برای افزودنی سولکتال-استین با سوخت بنزین



شکل ۴- نمودار آشفته‌گی بازده اکسرژی

با توجه به نمودار، A: سولکتال-استین؛ B: بار اعمال‌شده؛ C: سرعت است.

- Cavalcanti, E. J. C. (2019). Exergy, exergoeconomic and environmental analysis of diesel engine operating with EGR rate. *Int. J. Exergy*, 29: 22–39.
- Hulwan, D. B., and S. V. Joshi. (2011). Performance, emission and combustion characteristic of a multicylinder DI diesel engine running on diesel–ethanol–biodiesel blends of high ethanol content. *Applied Energy*, 88: 5042–5055.
- Imdadul, H.K., Masjuki, H.H., Kalam, M.A., Zulki, N.W.M., Rashed, M.M. (2015). A comprehensive review on the assessment of fuel additive effects on combustion behavior in CI engine fuelled with diesel biodiesel blends. *R. Soc. Chem.*, 5: 67541–67567.
- López, I., Quintana, C.E., Ruiz, J.J., Cruz-peragón, F., Dorado, M.P. (2014). Effect of the use of olive –pomace oil biodiesel / diesel fuel blends in a compression ignition engine : Preliminary exergy analysis. *Energy Convers. Manag.*, 85: 227–233.
- Nazzal, I.T., Kamil, M. (2020). Energy and exergy analysis of spark ignited engine fueled with GasolineEthanol-Butanol blends. *AIMS Energy*, 8: 1007–1029.
- Norouzi, N., Ebadi, A.G., Bozorgian, A., Hoseyni, S.J., Vessally, E. (2021). Energy and exergy analysis of internal combustion engine performance of spark ignition for gasoline, methane, and hydrogen fuels Iran. *J. Chem. Chem. Eng.*, 40: 1909–1930.
- Rakopoulos, C. D., and E. G. Giakoumis. (2006). Second-law analyses applied to internal combustion engines operation. *Progress in Energy and Combustion Science*, 32: 2–47.
- Rosen, M. A., I. Dincer, and M. Kanoglu. (2007). Rol of exergy in increasing efficiency and sustainability and reducing environmental impact. *Journal of Energy Policy*, 36: 128–137.
- Şanlı, B.G., Uludamar, E. (2019). Energy and exergy analysis of a diesel engine fuelled with diesel and biodiesel fuels at various engine speeds. *Energy Sources, Part A Recover. Util. Environ. Eff.* 0, 1–15.
- Szwaja, S., Gruca, M., Pyrc, M. (2022). Investigation on ethanol-glycerol blend combustion in the internal combustion sparkignited engine. Engine performance and exhaust emissions. *Fuel Process. Technol.* 226: 107085
- Tomar, M., Dewal, H., Sonthalia, A., Kumar, N., (2021). Optimization of spark-ignition engine characteristics fuelled with oxygenated bio-additive (triacetin) using

احتراق سرازیر شده و میزان مصرف سوخت افزایش پیدا کند. زمانی که بار و سرعت وارد شده بر موتور افزایش می‌یابد، نرخ اکسرژی هم افزایش می‌یابد و با افزایش بارهای وارده بر موتور از ۱/۲ نیوتن‌متر به ۱۱/۲ نیوتن متر دمای محفظه احتراق و بلوک سیلندر نیز افزایش پیدا می‌کند که سبب بهبود روند احتراق و بالا رفتن بازده اکسرژی می‌گردد. بیش‌ترین بازده اکسرژی به میزان ۱۹/۵۹ درصد در سرعت ۱۰۴۴ دور بر دقیقه و بار اعمالی ۱۱/۲ نیوتن متر برای سوخت بنزین به همراه ۵٪ سولکتال استین اتفاق افتاد. با توجه به نتایج، پیشنهاد می‌گردد در نحوه پاشش سوخت، زمان احتراق سوخت ترکیبی و بهینه‌سازی سوخت و سامانه به دلیل کاهش مصرف، مطالعات بیشتری صورت گیرد.

تشکر و قدردانی

بدین‌وسیله از دانشگاه محقق اردبیلی و دانشگاه تهران در راستای حمایت و در اختیار قرار دادن آزمایشگاه گروه مکانیک بیوسیستم مراتب قدردانی به عمل می‌آید.

منابع

- Aghbashlo, M., Tabatabaei, M., Mohammadi, P., Pourvosoughi, N., Nikbakht, A. M., Amir, S., Goli, H., & Goli, S. A. H. (2015). Improving exergetic and sustainability parameters of a DI diesel engine using polymer waste dissolved in biodiesel as a novel diesel additive. *Energy Convers. Manag.* 105.
- Akbiyik, T., Kahraman, N., & Taner, T. (2023). Energy and exergy analysis with emissions evaluation of a gasoline engine using different fuels. *Fuel*, 345: 128189.
- Caliskan, H., Ertunc, M., Hepbasli, A. (2009). Performance assessment of an internal combustion engine at varying dead (reference) state temperatures. *Appl. Therm. Eng.* 29: 3431–3436.
- Canakci, M., & Hosoz, M. (2006). Energy and exergy analyses of a diesel engine fuelled with various biodiesels, *Energy Sources B*, 1: 379–394.
- Castillo, E. D. (2007). *Process Optimization: A Statistical Approach*. New York: Springer.
- Caton, J. A. (2000). On the destruction of availability (exergy) due to combustion process e with specific application to internal-combustion engines. *Energy*, 25: 1097e117.

- response surface methodology. *Proc. Inst. Mech. Eng. Part E J. Process Mech. Eng.*
- Yusuf, A.A., Inambao, F.L. (2021). Progress in alcohol-gasoline blends and their effects on the performance and emissions in SI engines under different operating conditions. *Int. J. AmbientEnergy*.
- Zapata-Mina, J., Restrepo, A., Romero, C., Quintero, H. (2020). Exergy analysis of a diesel engine converted to spark ignition operating with diesel, ethanol, and gasoline/ethanol blends. *Sustain. Energy Technol. Assessments*, 42: 100803.