



The effect of engine warm-up time on emission levels

Hadi Ghasemi Zavaragh*, Bahman Rahmatinejad, Hossein Rahimi Asiabaraki

Department of Mechanical Engineering, Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran

ARTICLE INFO

Keywords:

Internal Combustion Engine
Pollutant Emissions
Warm-Up
Carbon Monoxide
Nitrogen Oxides
Unburned Hydrocarbons

ABSTRACT

This study investigates the effect of engine warm-up time on the emissions of hydrocarbons, carbon monoxide, and nitrogen oxides. Data were analyzed under eight different engine speeds and two load conditions (15% and 30%) over a 15-minute period, in both thermostat and non-thermostat configurations. The results indicated that at 1,500 rpm and 15% load, installing a thermostat reduced the warm-up time by up to 29%. On average, increasing engine speed by 500 rpm shortened this time by 27% at 15% load and by 32% at 30% load. Furthermore, hydrocarbon emissions were substantially elevated during the first three minutes after start-up but stabilized within the range of 150–250 ppm once warm-up was complete. Nitrogen oxides exhibited the most significant variation: doubling the engine speed from 1,500 to 3,000 rpm tripled their concentration, and doubling the load increased it by approximately a factor of 1.6. Moreover, under low-speed and low-load conditions, installing a thermostat reduced carbon dioxide emissions both during and after the warm-up period. Ultimately, it can be concluded that shorter warm-up times, achieved through the use of a thermostat and optimal management of this period, significantly reduce pollutant levels and have a positive effect on controlling engine emissions. These results emphasize the importance of employing optimized cooling systems to decrease pollution and improve the environmental performance of combustion engines.



© 2026 Iranian Society of Engine, Tehran, Iran. This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution Noncommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0 license). (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

* Corresponding author

E-mail address: haghasemi@tvu.ac.ir (H. Ghasemi Zavaragh)

Received 18 December 2025; Accepted 3 August 2026

E-ISSN: 2345-4121/ISSN: 1735-5214

Cite this article: Ghasemi Zavaragh H, Rahmatinejad B, Rahimi Asiabaraki H. The effect of engine warm-up time on emission levels. The Journal of Engine Research. 2026 Aug 23;73(2):63-79. doi: 10.22034/ER.2026.2081271.1123

تأثیر زمان گرم شدن موتور بر میزان انتشار گازهای آلاینده

هادی قاسمی زوارق^{*}، بهمن رحمتی نژاد، حسین رحیمی آسیابارکی

گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه ملی مهارت، تهران، ایران

اطلاعات مقاله	چکیده
کلیدواژه‌ها: موتور احتراق داخلی انتشار آلاینده‌ها گرم کردن سریع موتور مونوکسید کربن اکسیدهای ازت هیدروکربن‌های نسوخته	این پژوهش تأثیر زمان گرم شدن موتور بر انتشار آلاینده‌های هیدروکربنی، مونوکسید کربن و اکسیدهای ازت را بررسی می‌کند. داده‌ها در هشت سرعت مختلف و دو بار کاری ۱۵ و ۳۰ درصد، طی ۱۵ دقیقه و در دو حالت با دمایان و بدون آن تحلیل شدند. نتایج نشان داد در دور ۱۵۰۰ و بار ۱۵٪، نصب دمایان زمان گرم شدن را تا ۲۹٪ کاهش می‌دهد. افزایش سرعت موتور به ازای هر ۵۰۰ دور در دقیقه، این زمان را به‌طور متوسط ۲۷٪ برای بار ۱۵٪ و ۳۲٪ برای بار ۳۰٪ کوتاه‌تر کرد. همچنین، انتشار هیدروکربن‌ها در سه دقیقه اول بسیار بالا بود، اما پس از گرم شدن به ۱۵۰-۲۵۰ ppm تثبیت شد. اکسیدهای ازت بیشترین تغییر را نشان دادند؛ به‌طوری‌که دو برابر شدن دور موتور از ۱۵۰۰ به ۳۰۰۰، غلظت آن را تا سه برابر و دو برابر شدن بار، آن را ۱۶ برابر افزایش داد. همچنین، در شرایط سرعت و بار پایین، نصب دمایان موجب کاهش انتشار دی‌اکسید کربن در دوره گرم شدن و پس از آن شد. در نهایت، می‌توان نتیجه گرفت که زمان گرم شدن کوتاه‌تر با استفاده از دمایان و مدیریت بهینه این دوره، به شکل قابل توجهی باعث کاهش آلاینده‌ها می‌شود و تأثیر مثبتی بر مهار آلودگی‌های خروجی از موتور دارد. این نتایج بر اهمیت استفاده از سامانه‌های خنک‌کننده بهینه در کاهش آلودگی و بهبود عملکرد زیست محیطی موتورهای احتراقی تأکید می‌کند.



© 2026 Iranian Society of Engine, Tehran, Iran. This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution Noncommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0 license). (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

^{*} نویسنده مسئول

پست الکترونیکی: haghasemi@tvu.ac.ir (هادی قاسمی زوارق)

دریافت ۲۷ آذر ۱۴۰۴؛ پذیرش ۱۲ مرداد ۱۴۰۵

شاپای الکترونیکی: ۴۱۲۱-۳۳۴۵ / شاپای چاپی: ۵۲۱۴-۱۷۳۵

Cite this article: Ghasemi Zavaragh H, Rahmatinejad B, Rahimi Asiabaraki H. The effect of engine warm-up time on emission levels. The Journal of Engine Research. 2026 Aug 23;73(2):63-79. doi: 10.22034/ER.2026.2081271.1123

۱- مقدمه

موتورهای احتراق داخلی در دنیای امروز کاربردهای گسترده‌ای دارند. در این سامانه‌ها، تولید توان با بازدهی بالا وابسته به عملکرد صحیح تمامی اجزاست [۱]. این موتورها از جمله منابع اصلی آلودگی هوا محسوب شده و سهم قابل توجهی در انتشار گازهای گلخانه‌ای و دیگر آلاینده‌های مضر ایفا می‌کنند. آلاینده‌های خروجی از موتورها، نظیر هیدروکربن‌ها، مونوکسیدکربن^۲، اکسیدهای ازت^۳، ذرات معلق^۴ و ترکیبات آلی فرار^۵، در شکل‌گیری پدیده‌هایی مانند دود، بروز بیماری‌های تنفسی و تخریب محیط‌زیست نقش دارند و از این رو نگرانی‌های فزاینده‌ای را در میان عموم مردم و نهادهای نظارتی برانگیخته‌اند.

درک عوامل مؤثر بر انتشار این آلاینده‌ها برای توسعه راهکارهای کارآمد به‌منظور کاهش پیامدهای زیست‌محیطی آن‌ها ضروری است. یکی از عوامل کلیدی مؤثر بر انتشار آلاینده‌ها، زمان گرم‌شدن موتور است که به مدت زمان لازم برای رسیدن موتور به دمای کارکرد بهینه اطلاق می‌شود. در این دوره، کارایی احتراق معمولاً ضعیف‌تر است و به افزایش انتشار آلاینده‌ها منجر می‌گردد.

مطالعات پیشین نشان داده‌اند که راه‌اندازی سرد موتور، به دلیل احتراق ناقص و استفاده از مخلوط سوخت غنی برای تسهیل جرقه‌زنی، موجب انتشار بیشتر آلاینده‌ها می‌شود. پژوهش‌ها حاکی از آن است که انتشار هیدروکربن‌ها و مونوکسیدکربن بویژه در دقایق اولیه پس از راه‌اندازی موتور به‌طور چشمگیری افزایش می‌یابد؛ در مقابل، با گرم شدن موتور، احتراق کارآمدتر شده و در نتیجه انتشار این آلاینده‌ها کاهش پیدا می‌کند. برای این منظور باید هر چه سریع‌تر موتور را گرم کرد تا زمان رسیدن به دمای تعادل کوتاه‌تر شود؛ این فرایند اصطلاحاً به فرایند گرم کردن سریع موتور^۶ معروف است.

علاوه بر این، تأثیر زمان گرم‌شدن ممکن است با توجه به متغیرهایی همچون نوع موتور (بنزینی یا دیزلی)، ساختار سوخت و شرایط کاری متفاوت باشد. با توجه به کاربرد گسترده موتورهای احتراق داخلی، این موضوع جایگاه ویژه‌ای را در پژوهش‌های دانشگاهی و صنعتی به خود اختصاص داده است [۲]. پژوهش‌های متعددی در حوزه انتشار آلاینده‌های موتور تحت شرایط عملکردی گوناگون انجام شده است که در ادامه به بخشی از آن‌ها اشاره می‌شود.

نعمتی و همکاران [۳] تأثیر زمان‌بندی و مرحله‌بندی تزریق سوخت بر آلاینده‌های یک موتور تک‌استوانه بنزینی را بررسی کردند. آن‌ها با ارزیابی داده‌های حسگر فشار در منیفولد ورودی، یک الگوی مدیریتی برای تعیین حالت تزریق سوخت و شناسایی لحظه بسته‌شدن سوپاپ ورودی ارائه نمودند. این قابلیت سپس به سامانه مدیریت موتور افزوده و عملکرد آن ارزیابی شد. نتایج حاکی از آن بود که تعیین حالت تزریق از طریق این روش به‌خوبی امکان‌پذیر است. همچنین، به‌منظور بررسی تأثیر الگوی پیشنهادی بر کاهش آلاینده‌های خروجی، آزمون استاندارد آلاینده‌های ECE-R40 انجام و نتایج آن با وضعیت پایه (بدون استفاده از این الگو) مقایسه گردید. این مقایسه نشان می‌دهد که با به‌کارگیری الگوریتم تشخیص حالت، میانگین غلظت مونوکسیدکربن، هیدروکربن‌های نسوخته و اکسیدهای ازت به ترتیب ۵.۹، ۹.۴ و ۲.۶ درصد کاهش می‌یابد.

اکبری‌ان و نجفی [۴] تأثیر متغیرهای عملیاتی بر تأخیر اشتعال در یک موتور دوگانه‌سوز (گازوئیل-گاز طبیعی) را بررسی کردند. آن‌ها متغیرهایی چون بار موتور، نسبت سوخت‌ها و زاویه پاشش سوخت را بررسی کردند. یافته‌های آن‌ها نشان داد که با افزایش بار موتور، تأخیر اشتعال در هر دو حالت عملکرد دیزل خالص و دوگانه‌سوز کاهش می‌یابد؛ با این حال، تأخیر

^۱ HC^۲ CO^۳ NO_x^۴ PM^۵ VOCs^۶ Warm-up

اشتعال در حالت دیزل خالص تحت تمامی شرایط آزمایشی کمتر از حالت دوگانه‌سوز بود. همچنین، افزایش زاویه پیش‌رسی موجب کاهش نسبی تأخیر اشتعال در حالت دوگانه‌سوز گردید، در حالی که در حالت دیزل خالص تأثیر محسوسی مشاهده نشد.

کالتاکیران و باکرچی [۵] به بررسی تجربی یک راهبرد مدیریت حرارتی هوشمند برای سامانه خنک‌کاری موتور در دوره گرم‌شدن پرداختند. آزمایش‌ها بر روی یک موتور آزمایشی جرقه‌زنی با سوخت بنزین تحت شرایط گوناگون بار و سرعت متغیر انجام شد. در این پژوهش، یک تلمبه برقی به سامانه خنک‌کاری افزوده شد که امکان فعال‌سازی براساس نیاز برای ارسال جریان مهارشده سیال خنک‌کننده را فراهم می‌آورد. با انجام تجزیه و تحلیل‌های توازن انرژی و بررسی ویژگی‌های عملکرد موتور در حالت گرم‌شدن، مشخص گردید که راهبرد مهار جریان سیال خنک‌کننده تأثیر مثبتی بر بازده موتور و کاهش انتشار مونوکسیدکربن دارد. به‌کارگیری این راهکار، مصرف سوخت ویژه را تحت بارهای مختلف بترتیب ۷.۷۲ و ۵.۲ درصد بهبود بخشید.

شوکه‌نوف و همکاران [۶] تأثیر دمای هوای محیط بر فرآیند گرم‌شدن موتور خودروها را مورد مطالعه قرار دادند. یافته‌های آن‌ها حاکی از اثرگذاری قابل‌توجه این متغیر بر مدت زمان گرم‌شدن بود. در این پژوهش، با انجام آزمایش‌های مقایسه‌ای بر روی تراکتورها در شرایط کاری مختلف، دمای سیال خنک‌کننده به‌عنوان شاخص اصلی تعیین وضعیت گرم‌شدن موتور انتخاب شد. دمای ۸۵ درجه سانتی‌گراد به عنوان دمای پایه برای گرم‌شدن سیال در نظر گرفته شد. دامنه دمای محیط در آزمایش‌ها از ۲۰ درجه سانتی‌گراد بالای صفر تا ۳۰ درجه سانتی‌گراد زیر صفر متغیر بود. همچنین، تأثیر حالت‌های مختلف بار بر طول دوره گرم‌شدن موتور تراکتور نیز بررسی گردید.

دی جووین و همکاران [۷] به بررسی تأثیر گرم کردن روغن موتور بر مصرف سوخت پرداختند. در این پژوهش، رابطه بین دمای روغن و مصرف سوخت در یک موتور دیزل توربوشارژ ارزیابی و داده‌های نظری با نتایج تجربی مقایسه شد. آن‌ها چندین راهبرد برای تسریع فرآیند گرم‌شدن روغن موتور به کار گرفتند و در تمامی آزمایش‌ها، مقدار انتشار دی‌اکسیدکربن^۱ نیز اندازه‌گیری و تحلیل گردید.

لی و همکاران [۸] به بررسی امکان بهبود عملکرد گرم‌شدن خودرو با به‌کارگیری مواد تغییر حالت‌دهنده و روش‌های ذخیره‌سازی حرارتی پرداختند. هدف اصلی این پژوهش، بازیابی انرژی حرارتی تلف‌شده در طول فرآیند خنک‌شدن موتور به‌منظور بهبود شرایط راه‌اندازی سرد و در نهایت کاهش مصرف سوخت و انتشار آلاینده‌ها بود. در این راستا، یک دستگاه ذخیره‌سازی حرارتی طراحی و ساخته شد. نتایج نشان داد که مقدار انرژی انتقال‌یافته در بازه‌های زمانی ۴، ۸، ۱۶ و ۲۴ ساعت به ترتیب ۵۹۱، ۴۸۹، ۴۴۶ و ۳۱۵ کیلوژول است. همچنین، استفاده از این سامانه ذخیره‌سازی حرارتی، زمان مورد نیاز برای رسیدن دمای موتور به ۷۰ درجه سانتی‌گراد را تا ۲۴.۴۵ درصد کاهش داد. این کاهش در زمان گرم‌شدن، مستقیماً به تثبیت سریع‌تر شرایط عملکردی موتور کمک کرده و منجر به بهبود کارایی سوخت و کاهش محسوس در انتشار آلاینده‌هایی نظیر دی‌اکسیدکربن می‌گردد.

زمان گرم‌شدن موتورهای احتراق داخلی تأثیر بسزایی بر مقدار انتشار آلاینده‌های آن‌ها دارد. در شرایط راه‌اندازی سرد، عملکرد موتور با مخلوط سوخت غنی‌تر همراه است تا افت دمای احتراق جبران گردد؛ این امر به احتراق ناقص و در نتیجه افزایش انتشار هیدروکربن‌ها، مونوکسیدکربن و اکسیدهای ازت منجر می‌شود. در این پژوهش ارزیابی همزمان و ساختاری اثر متقابل چهار عامل کلیدی یعنی زمان گرمایش، دور موتور، بار کاری و وجود یا عدم وجود دماپان بر مقدار زمانی مجموعه کاملی از آلاینده‌ها (شامل HC، CO، NOx، CO₂ و O₂) در یک موتور بنزینی واقعی بررسی شد که در مطالعات پیشین کمتر به‌صورت یکپارچه و با این سطح از جزئیات بررسی شده بود. همچنین، تعیین کمی مقدار کاهش زمان گرمایش به‌ازای هر ۵۰۰ دور افزایش سرعت (به‌ترتیب ۲۷ و ۳۲٪ برای بارهای ۱۵ و ۳۰٪) و نیز کمی‌سازی رابطه مستقیم بین کوتاه‌شدن

^۱ CO₂

این دوره و کاهش انتشار آلاینده‌هایی نظیر HC و CO از دیگر دستاوردهای اصلی و نوآورانه این مطالعه محسوب می‌شود که می‌تواند مرجعی کاربردی برای طراحان سامانه خنک‌کننده و مدیران راهبرد تنظیم سوخت در شروع سرد موتور باشد.

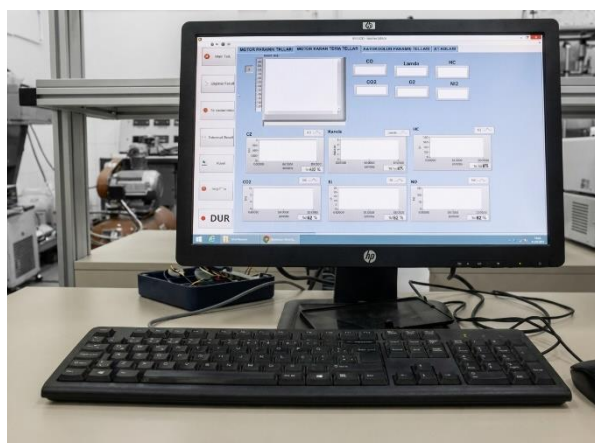
۲- مواد و روش‌ها

در این پژوهش، از یک موتور چهار استوانه Ford MVH418 استفاده شد. مشخصات فنی این موتور در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱ مشخصات فنی موتور Ford MVH418 [۹]

موتور	Ford MVH418
تعداد استوانه	چهار استوانه خطی
حجم موتور (L)	۱.۷۹۶
قطر استوانه (mm)	۸۰.۶
طول پیمایش (mm)	۸۸
نسبت تراکم	۱۰
حداکثر توان	۷۷ هزار وات
حداکثر گشتاور	۱۵۳ نیوتن‌متر در دور ۴۰۰۰ د.د.د.
دور آرام	۷۵۰ د.د.د.
دور بیشینه	۵۹۵۰ د.د.د.

گازهای خروجی توسط یک دستگاه سنجش گازهای خروجی (BOSCH-BEA 250) اندازه‌گیری شد. توسط این دستگاه می‌توان گازهای خروجی را تجزیه و تحلیل نمود و سطح آلاینده‌هایی مانند مونوکسید کربن، هیدروکربن‌ها، اکسیدهای ازت و ذرات معلق را اندازه‌گیری کرد. این ابزار معمولاً شامل قابلیت‌هایی برای ذخیره و بازیابی نتایج آزمون‌های قبلی است که می‌تواند برای مستندسازی انطباق با مقررات زیست‌محیطی یا برای سوابق مشتریان مفید باشد (شکل ۱).



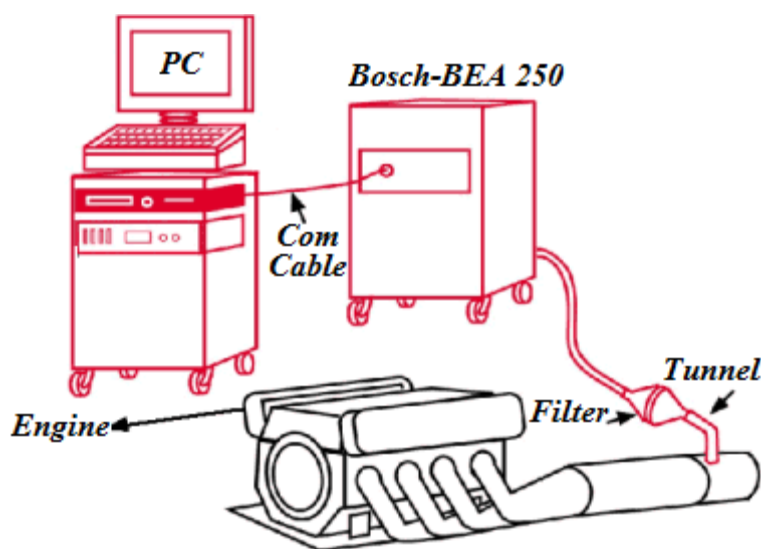
(ب)



(الف)

شکل ۱ (الف) دستگاه شناسایی گازهای خروجی، (ب) رایانه ثبت اطلاعات گازهای خروجی

دستگاه با استفاده از یک نمونه بردار^۱ به سامانه دود موتور متصل می شود تا گازهای خروجی را جمع آوری کند. این گازها سپس در معرض حسگرهای ویژه داخل دستگاه قرار می گیرند که هر یک برای سنجش گاز خاصی طراحی شده اند. نتایج حاصل از این سنجش ها بر روی صفحه نمایش دستگاه قابل مشاهده است که مقادیر گازهای CO, HC, NO_x, CO₂ و O₂ را نمایش می دهد. نحوه اتصال دستگاه در شکل ۲ نشان داده شده است. محدوده اندازه گیری و دقت دستگاه نیز در جدول ۲ ارائه شده است.



شکل ۲ نحوه اتصال دستگاه شناسایی گازهای خروجی به موتور و رایانه ثبت اطلاعات

جدول ۲ محدوده اندازه گیری و دقت دستگاه BOSCH-BEA 250

ویژگی	بازه اندازه گیری	وضوح
CO	0.000 – 10.00 % vol	0.001 % vol
CO ₂	0.00 – 18.00 % vol	0.01 % vol
HC	0 – 9999 ppm vol	1 ppm vol
O ₂	0.00 – 22.00 % vol	0.01 % vol
λ	0.500 – 9.999	0.001
NO _x	0 – 5000 ppm vol	< = 1 ppm vol

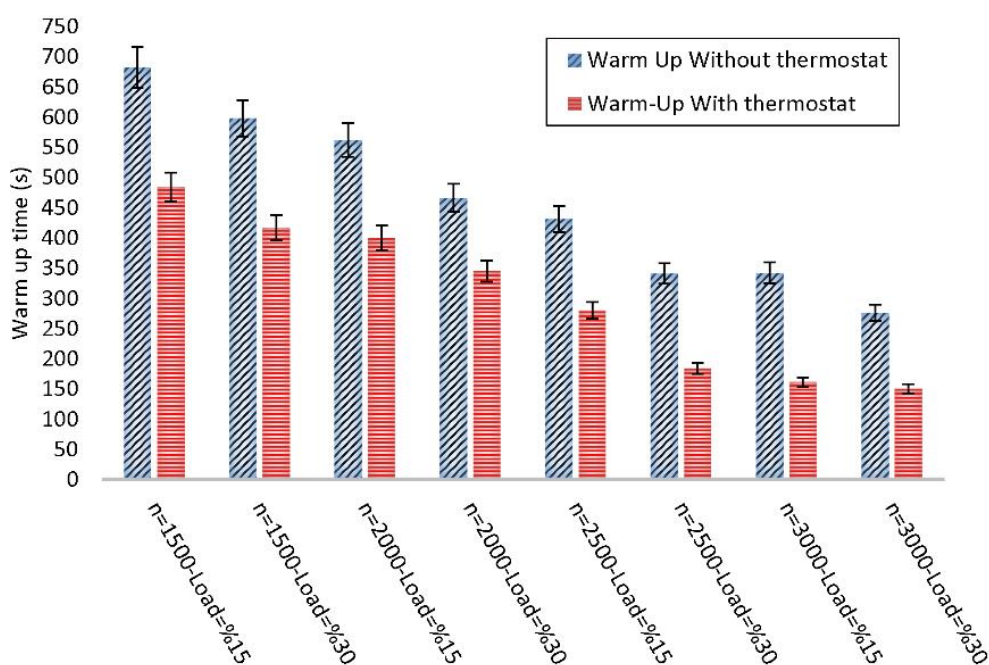
تمامی آزمایش ها در شرایط محیطی تنظیم شده با دمای 27 ± 1 درجه سانتی گراد، رطوبت نسبی 45 ± 5 درصد و فشار اتمسفر 101.3 کیلوپاسکال انجام شد. موتور در هشت سرعت مختلف و دو سطح بار (15% و 30%) به مدت 15 دقیقه، در دو حالت با دمايان و بدون دمايان آزمایش شد. دمای بهینه سیال خنک کننده موتور 83 درجه سانتی گراد در نظر گرفته شد [۱۰]. لازم به ذکر است که در این تحقیق، دمای سیال خنک کننده توسط یک حسگر حرارتی از نوع دماسنج K-type، دقیقاً در نقطه خروجی سیال از موتور اندازه گیری شد و زمان گرم شدن موتور به عنوان مدت زمان لازم برای رسیدن دمای خروجی سیال خنک کننده به 83 درجه سانتی گراد تعریف گردید. این دما مطابق با دمای باز شدن دمايان و دمای عملیاتی بهینه موتور مورد نظر بوده و به دلیل همبستگی مستقیم تر با دمای دیواره استوانه و کیفیت احتراق، نسبت به دمای روغن موتور به عنوان شاخص اصلی پایان دوره گرمایش انتخاب شده است. دمای روغن موتور نیز به صورت کمکی ثبت گردید اما به دلیل تأخیر حرارتی ذاتی، مبنا قرار نگرفت.

¹ Probe

راهبرد رایانه موتور به گونه‌ای است که در لحظه راه‌اندازی سرد، سامانه در حالت حلقه باز فعالیت کرده و بر اساس جداول کالیبراسیون داخلی (تابع دمای سیال خنک‌کننده و زمان سپری‌شده از راه‌اندازی)، مخلوط سوخت را به صورت غنی‌تر از نسبت درست^۱ تنظیم می‌نماید. حسگر اکسیژن، پس از رسیدن دمای قطعه حرارتی آن به حدود ۳۵۰ درجه سانتی‌گراد (معمولاً ۳۰ تا ۴۵ ثانیه پس از راه‌اندازی سرد) فعال شده و سامانه وارد حالت حلقه بسته می‌گردد؛ در این حالت، نسبت هوا به سوخت بر اساس بازخورد حسگر اکسیژن اصلاح شده و به سمت $\lambda = 1$ هدایت می‌شود.

۳- نتایج و بحث

زمان گرم‌شدن موتور به عوامل متعددی از جمله نوع موتور، دمای محیط، نوع روغن، طراحی سامانه خنک‌کننده و مشخصات سیال خنک‌کننده بستگی دارد [۱۱]. به طور کلی، موتورهای بنزینی معمولاً به حدود ۱۰ تا ۱۵ دقیقه زمان برای رسیدن به دمای بهینه نیاز دارند. آزمایش‌ها در دو مرحله بدون دمايان و با یک دمايان با دمای عملکرد ۸۳ درجه سانتی‌گراد انجام شد. در تمامی آزمایش‌ها، زمان گرم‌شدن با افزایش بار و سرعت موتور به صورت محسوسی کاهش یافت. به عنوان مثال، مقایسه آزمون آخر (سرعت ۳۰۰۰ د.د.د.، بار ۳۰٪) با آزمون اول (سرعت ۱۵۰۰ د.د.د.، بار ۱۵٪) نشان می‌دهد که زمان گرم‌شدن تقریباً به نصف کاهش یافته است. تحلیل نتایج حاکی از آن است که به ازای هر افزایش ۵۰۰ د.د.د.ی در سرعت موتور، زمان گرم‌شدن به طور میانگین ۲۷٪ برای بار ثابت ۱۵٪ و ۳۲٪ برای بار ثابت ۳۰٪ کوتاه‌تر می‌شود. همچنین، افزایش بار از ۱۵٪ به ۳۰٪ در سرعت ثابت، به طور متوسط موجب کاهش ۲۰٪ در مدت زمان این دوره می‌گردد. مناسب‌ترین متغیر برای ارزیابی تأثیر نصب دمايان بر عملکرد موتور، مقایسه زمان گرم‌شدن در دو حالت با و بدون دمايان است. نتایج این مقایسه در نمودار شکل ۳ ارائه شده که گویای کاهش قابل توجه این زمان با افزودن دمايان می‌باشد. به عنوان نمونه، در دور ۱۵۰۰ و بار ۱۵٪، استفاده از دمايان کاهش ۲۹٪ را در زمان گرم‌شدن موتور سبب شده است. کوتاه‌شدن این دوره، تأثیر قابل توجهی بر مصرف سوخت و مقدار انتشار آلاینده‌های موتور دارد.



شکل ۳ مقایسه زمان گرم‌شدن موتور بر اساس دور و بار اعمالی در حالت با و بدون دمايان

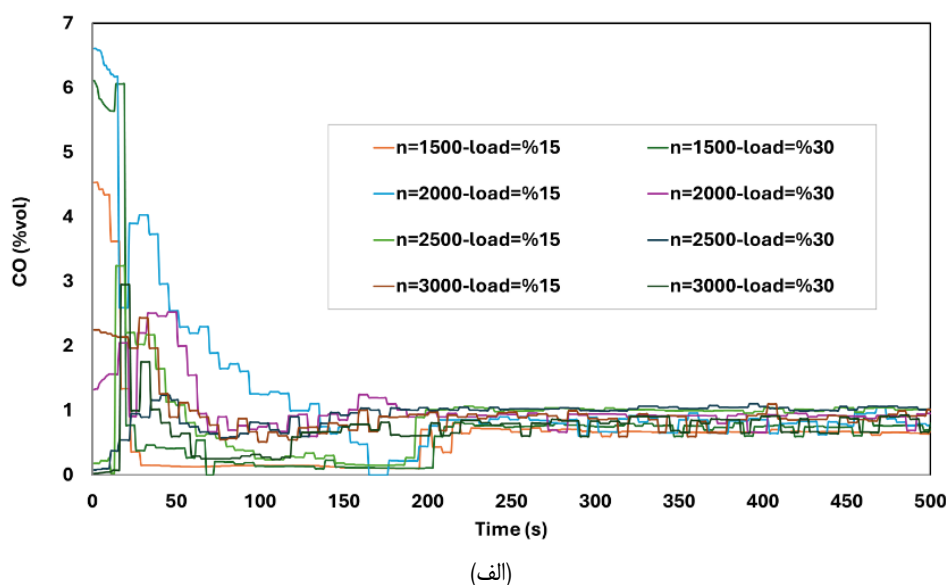
¹ Stoichiometric

گازهای خروجی خودروها متشکل از مجموعه‌ای از ترکیبات شیمیایی هستند که از فرآیند احتراق سوخت در موتور ناشی می‌شوند. کاهش انتشار این آلاینده‌ها از اهداف اصلی فناوری‌های مهار آلاینده‌گی محسوب می‌گردد. بر این اساس، پژوهش حاضر به بررسی تأثیر زمان گرم شدن موتور بر انتشار گازهای خروجی می‌پردازد. در این راستا، شش متغیر گازهای خروجی شامل مونوکسیدکربن، اضافه‌هوا^۱، هیدروکربن‌ها، دی‌اکسیدکربن، اکسیژن^۲ و اکسیدهای ازت ارزیابی شدند. در تمامی آزمون‌های انجام شده، هر شش متغیر مذکور در طول دوره گرم شدن، نوسانات شدیدی را نشان دادند. با اتمام این دوره و تثبیت شرایط عملکردی موتور، مقادیر متغیرها نیز به حالت پایدار می‌رسند.

۳-۱- بررسی مونوکسیدکربن تولیدی

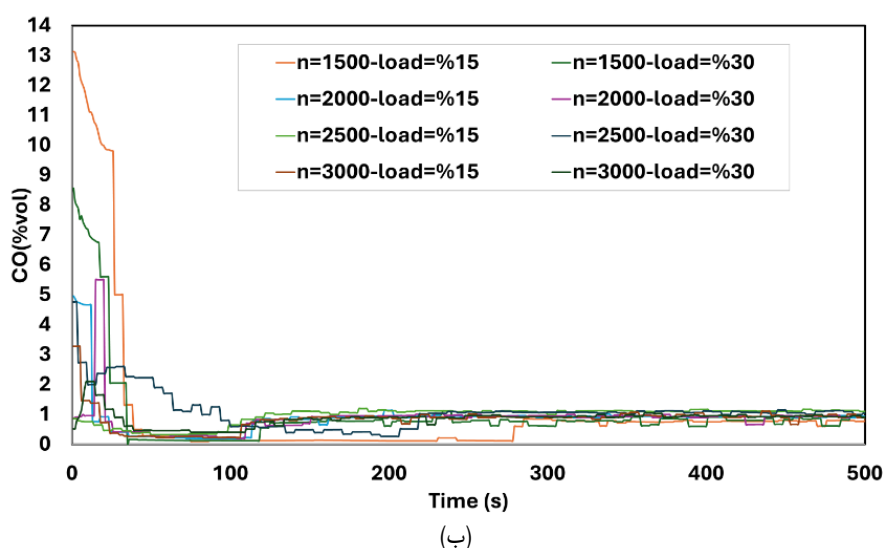
مونوکسیدکربن گازی سمی و خطرناک است که از احتراق ناقص سوخت‌های فسیلی مانند بنزین در موتور خودروها حاصل می‌شود. تولید این گاز به عنوان محصول جانبی احتراق، عمدتاً در شرایطی که سوخت به طور کامل سوزانده نشود و یا در شرایط تنظیم نادرست سامانه سوخت‌رسانی رخ می‌دهد. مونوکسیدکربن پس از استنشاق به سرعت از ریه‌ها جذب خون شده و با هموگلوبین ترکیب می‌گردد که این امر منجر به کاهش ظرفیت انتقال اکسیژن خون و ایجاد مخاطرات جدی برای سلامت انسان می‌شود. در این پژوهش، مقدار مونوکسیدکربن اندازه‌گیری شده در طول دوره گرم شدن موتور دارای نوساناتی بود، اما در حالت پایدار موتور در هر هشت آزمون به طور محسوسی کاهش یافته و در محدوده ۰.۵ تا ۱ واحد تثبیت شد. بالاترین مقادیر انتشار مونوکسیدکربن در طول دوره گرم کردن موتور ثبت گردید و در مواردی تا پنج برابر مقدار مربوط به حالت پایدار موتور افزایش یافت.

در حالت وجود دما، نمودار انتشار مونوکسیدکربن در طول دوره گرم شدن نوسانات قابل توجهی دارد. با اتمام این دوره، مقدار انتشار در بازه ۰.۵ تا ۱ درصد حجمی تثبیت می‌شود. همان‌طور که در شکل ۴ مشاهده می‌گردد، استفاده از دما، باعث می‌شود نمودار انتشار مونوکسیدکربن دیر شروع شود؛ این پدیده بویژه در سرعت‌های پایین موتور مشهود است. روند کلی تغییرات این متغیر به این صورت است که پس از یک افزایش اولیه، با افزایش تدریجی سرعت و بار موتور، کاهش می‌یابد.



¹ Lambda

² O₂

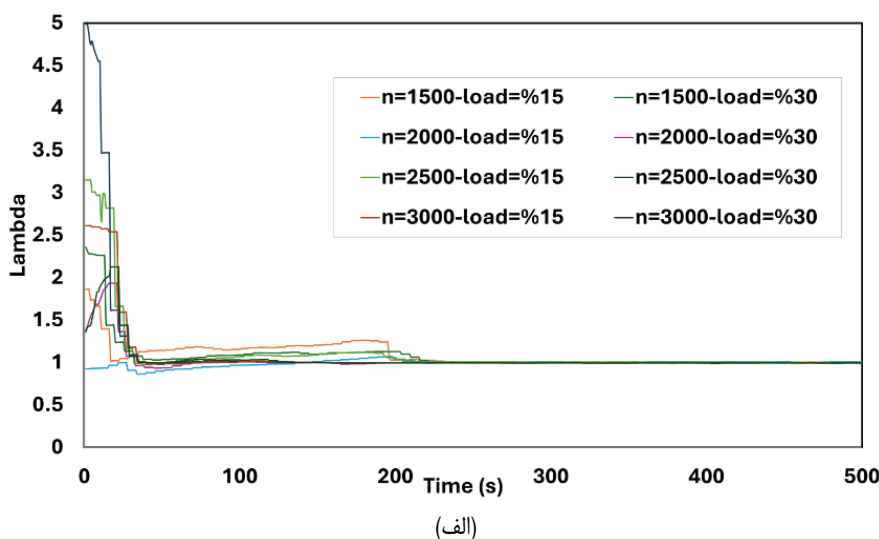


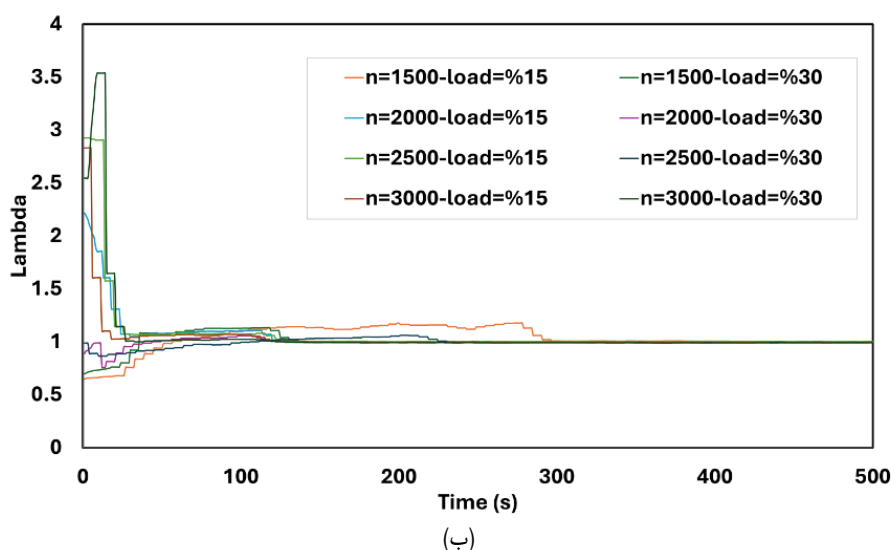
شکل ۴ مقدار انتشار مونوکسیدکربن موتور در حالت الف) بدون دمايان، ب) با دمايان

۳-۲- بررسی اضافه‌هوا تولیدی

متغیر اضافه‌هوا (λ) نسبت هوا به سوخت واقعی به نسبت هوا به سوخت درست را نشان می‌دهد. این متغیر بدون بعد، که به عنوان نسبت اضافه‌هوا نیز شناخته می‌شود، نقش کلیدی در تنظیم و بهینه‌سازی احتراق موتورهای احتراق داخلی ایفا کرده و شاخصی از کارایی فرآیند احتراق محسوب می‌گردد. مقدار اضافه‌هوا مقدار غنی یا رقیق شدن مخلوط سوخت و هوا را به صورت عددی نسبت به حالت درست ($\lambda = 1$) نشان می‌دهد. مخلوط غنی ($\lambda < 1$) می‌تواند به احتراق ناقص و افزایش انتشار آلاینده‌هایی مانند هیدروکربن‌ها و مونوکسیدکربن منجر شود. در مقابل، مخلوط رقیق ($\lambda > 1$) ممکن است سبب افزایش دمای احتراق، کاهش توان خروجی و تشدید تولید اکسیدهای ازت گردد. مقدار بهینه $\lambda = 1$ ، که نشان‌دهنده احتراق کامل است، معمولاً بالاترین بازده و کمترین انتشار آلاینده را به همراه دارد.

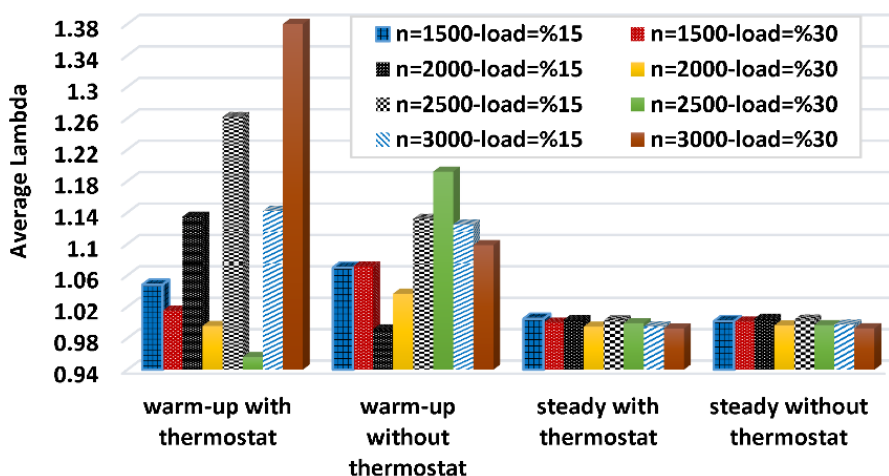
نمودار شکل ۵ تغییرات اضافه‌هوا را در طول زمان آزمایش نشان می‌دهد. در آغاز آزمون، به دلیل دمای پایین موتور، طولانی بودن دوره گرم‌شدن و عدم فعال‌شدن حسگر اکسیژن، واحد کنترل الکترونیکی موتور به طور مداوم نسبت هوا به سوخت را تنظیم می‌کند تا به شرایط درست نزدیک شود. پس از اتمام دوره گرم‌شدن، واحد کنترل الکترونیکی موتور این متغیر را روی عدد یک تثبیت می‌نماید.





شکل ۵ تغییرات متغیر اضافه‌هوا در طول آزمایش در حالت الف) بدون دمايان، ب) با دمايان

در نمودار شکل ۶، مقادیر میانگین اضافه‌هوا قبل و بعد از دوره گرم‌شدن در دو حالت با و بدون دمايان مقایسه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، حضور دمايان موجب ناپایداری بیشتر اضافه‌هوا در طول دوره گرم‌شدن می‌گردد. با این وجود، پس از اتمام این دوره، تغییرپذیری متغیر مذکور در هر دو حالت به حداقل و تقریباً یکسان می‌رسد.

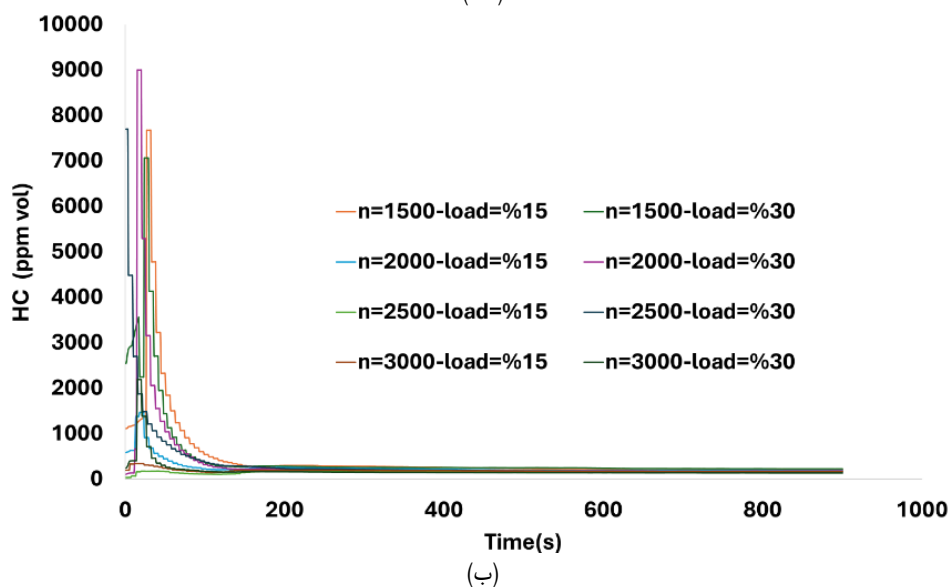
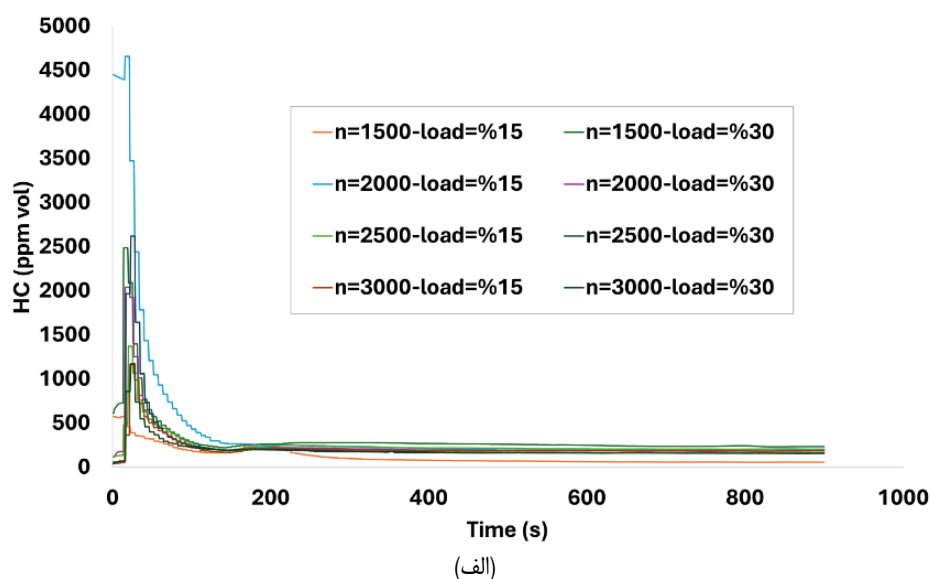


شکل ۶ ناپایداری متغیر اضافه‌هوا قبل و بعد از دوره گرم‌شدن در دو حالت با و بدون دمايان

۳-۳- بررسی هیدروکربن‌های تولیدی

هیدروکربن‌های نسوخته از جمله آلاینده‌های اصلی موتورهای احتراق داخلی محسوب می‌شوند. با توجه به اثرات زیانبار ثابت‌شده این ترکیبات، مطالعات گسترده‌ای در جهت کاهش غلظت آن‌ها در گازهای خروجی انجام شده است. نمودار شکل ۷ نشان می‌دهد که انتشار هیدروکربن‌های نسوخته در سه دقیقه اول پس از راه‌اندازی موتور در سطح بسیار بالایی قرار دارد، اما پس از گرم شدن موتور، مقدار آن در باند ۱۵۰ تا ۲۵۰ ppm تثبیت می‌شود. مقایسه این دو دوره حاکی از آن است که غلظت هیدروکربن‌های نسوخته در طول دوره گرم‌شدن گاهی اوقات تا ده برابر مقدار مربوط به دوره پایدار افزایش می‌یابد. از این رو، کوتاه کردن زمان گرم‌شدن موتور به کاهش قابل‌توجه انتشار هیدروکربن‌های نسوخته می‌انجامد.

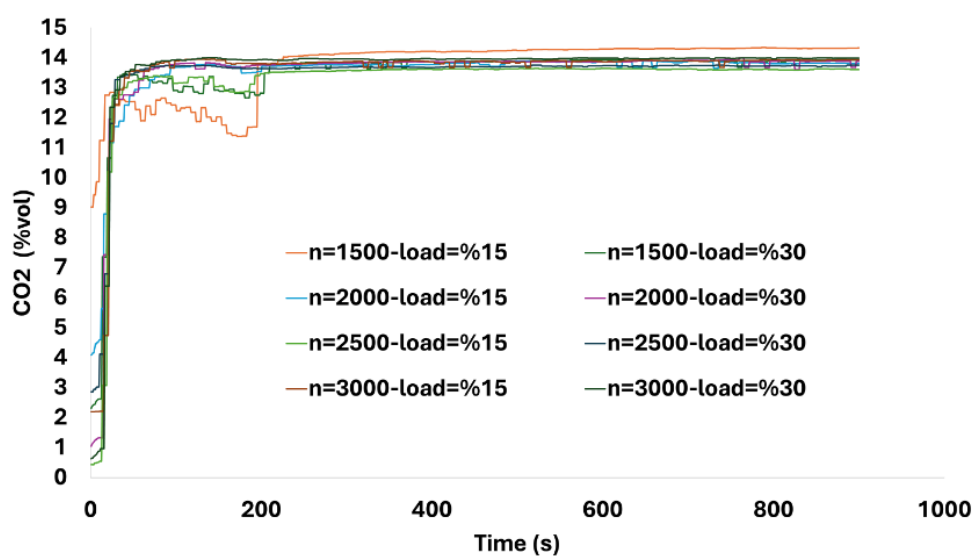
همچنین، مقدار انتشار هیدروکربن‌های نسوخته با سرعت و بار موتور نسبت معکوس دارد؛ به گونه‌ای که با افزایش دور و بار موتور پس از اتمام مرحله گرم شدن، غلظت این آلاینده کاهش می‌یابد.



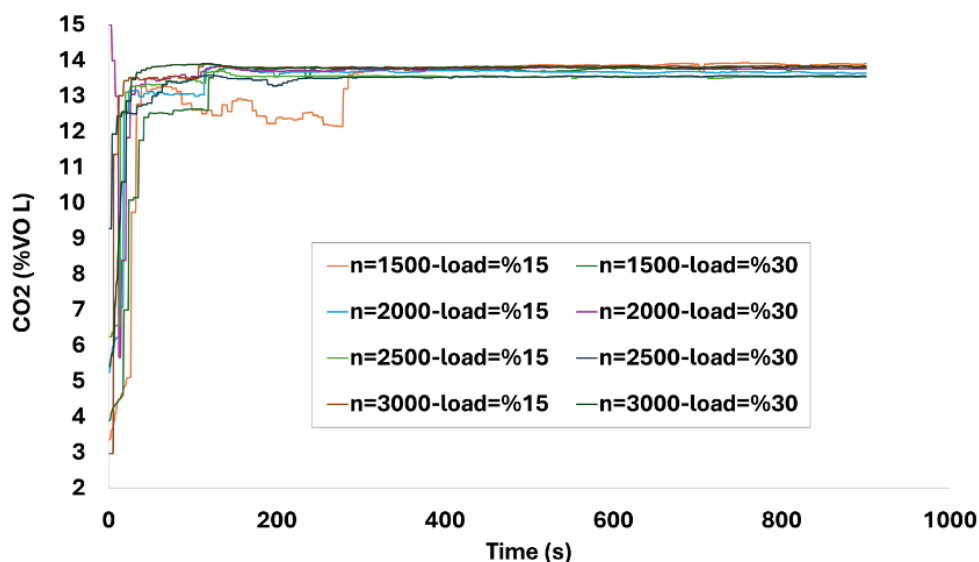
شکل ۷ انتشار هیدروکربن‌ها از موتور در حالت الف) بدون دمايان، ب) با دمايان

۳-۴- بررسی دی‌اکسیدکربن تولیدی

دی‌اکسیدکربن یکی از محصولات اصلی احتراق کامل در موتور محسوب می‌شود. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد روند انتشار دی‌اکسیدکربن در تضاد با سایر آلاینده‌هاست. دلیل کاهش این متغیر در دوره گرم شدن و افزایش آن در حالت پایدار، وقوع احتراق ناقص در مرحله اولیه است؛ زیرا دمای پایین موتور در طول گرم شدن از دستیابی به احتراق ایده‌آل جلوگیری می‌کند. در شرایط احتراق کامل، گازهای خروجی عمدتاً متشکل از دی‌اکسیدکربن خواهند بود، اما در احتراق ناقص، سهم قابل توجهی از کربن سوخت به صورت مونوکسیدکربن و هیدروکربن‌های نسوخته آزاد می‌شود. با افزایش سرعت و بار موتور، مقدار انتشار دی‌اکسیدکربن افزایش می‌یابد.



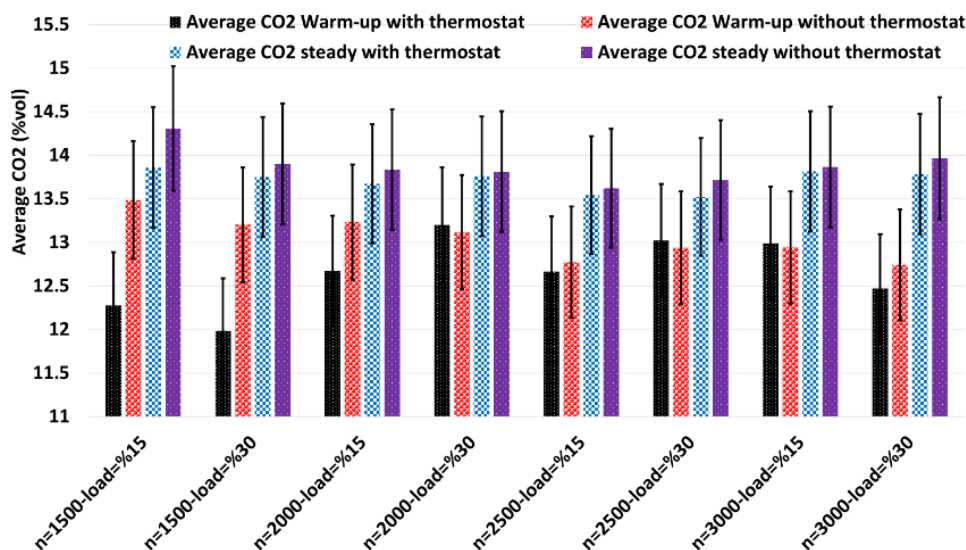
(الف)



(ب)

شکل ۸ انتشار دی اکسید کربن از موتور در حالت الف) بدون دما بان، ب) با دما بان

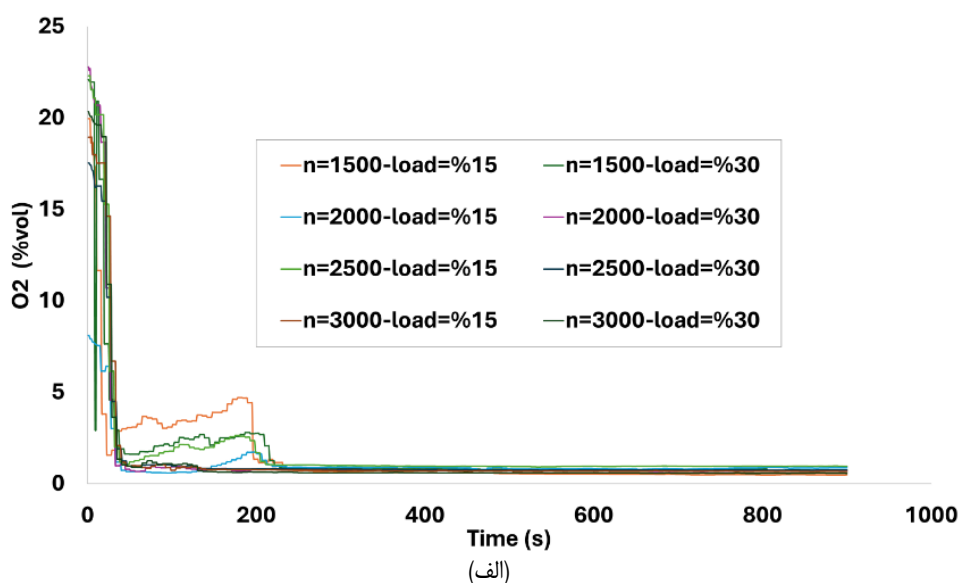
به منظور بررسی تأثیر نصب دما بان بر انتشار دی اکسید کربن، میانگین این متغیر در دو حالت با و بدون دما بان، هم در طول دوره گرم شدن و هم پس از آن محاسبه گردید. ابتدا زمان گرم شدن برای هر آزمون با توجه به رسیدن دمای سیال خنک کننده به دمای بهینه ۸۳ درجه سانتی گراد تعیین شد. سپس میانگین غلظت دی اکسید کربن در طول این بازه برای هر آزمایش محاسبه گردید. همچنین، میانگین انتشار دی اکسید کربن در بازه زمانی پس از گرم شدن نیز برای هر آزمون به دست آمد. این مقادیر میانگین به صورت نسبی و مقایسه ای در نمودار شکل ۹ ارائه شده اند. همان طور که در این نمودار مشاهده می شود، در بسیاری از شرایط (بویژه در سرعت ها و بارهای پایین)، استفاده از دما بان موجب کاهش انتشار دی اکسید کربن هم در حین گرم شدن و هم در مرحله پس از آن می گردد.

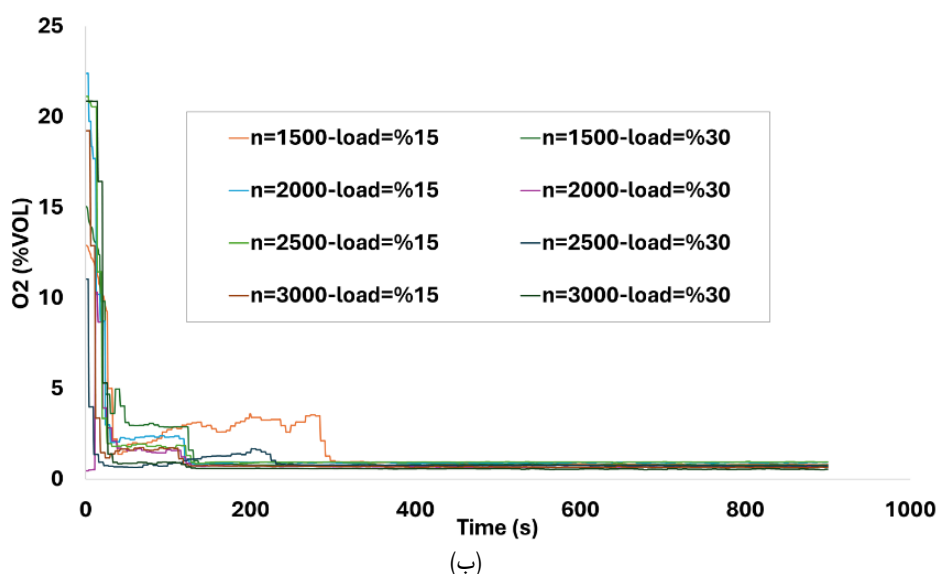


شکل ۹ مقایسه میانگین انتشار دی اکسید کربن در دوره گرم شدن و حالت پایدار موتور

۳-۵- بررسی اکسیژن تولیدی

در ابتدای دوره گرم شدن، به دلیل اختلاط ناقص سوخت پاشیده شده با هوای ورودی، توزیع غیریکنواخت نسبت هوا به سوخت در محفظه احتراق رخ می دهد که می تواند منجر به تشکیل مناطق غنی یا رقیق موضعی گردد. این ناهمگنی موجب می شود مقدار اکسیژن اندازه گیری شده در گازهای خروجی در این دوره نسبتاً افزایش یابد. همچنین، غیرفعال بودن حسگر اکسیژن تا پیش از رسیدن به دمای کارکرد، امکان تنظیم دقیق نسبت مخلوط توسط واحد کنترل الکترونیکی موتور را محدود می سازد. در نتیجه، غلظت اکسیژن در طول دوره گرم شدن، همگام با نوسانات اضافه هوا، کاهش و افزایش می یابد. با تثبیت شرایط موتور پس از گرم شدن، مقدار اکسیژن با افزایش بار موتور کاهش پیدا می کند و با افزایش دور موتور، ابتدا روندی افزایشی و سپس کاهشی را طی می نماید.

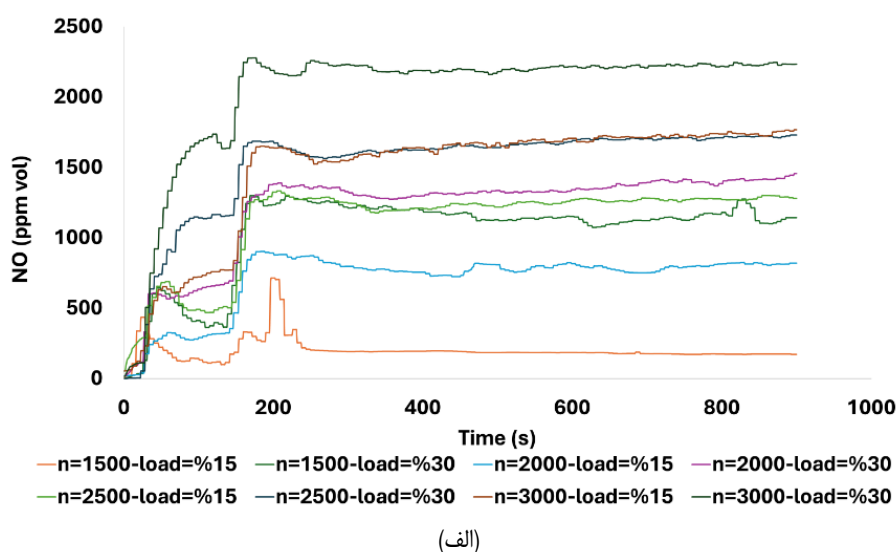


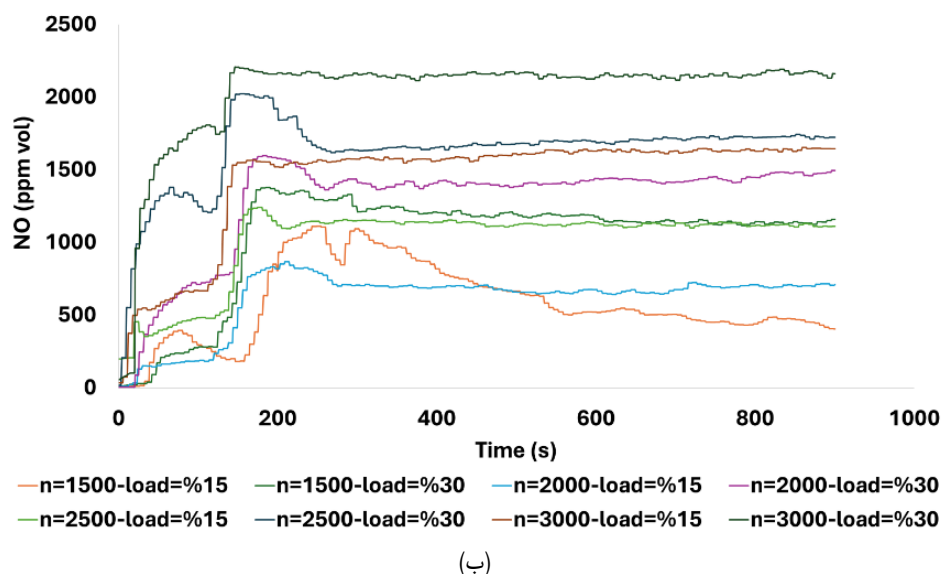


شکل ۱۰ انتشار اکسیژن از موتور در حالت الف) بدون دمايان، ب) با دمايان

۳-۶- بررسی اکسید ازت تولیدی

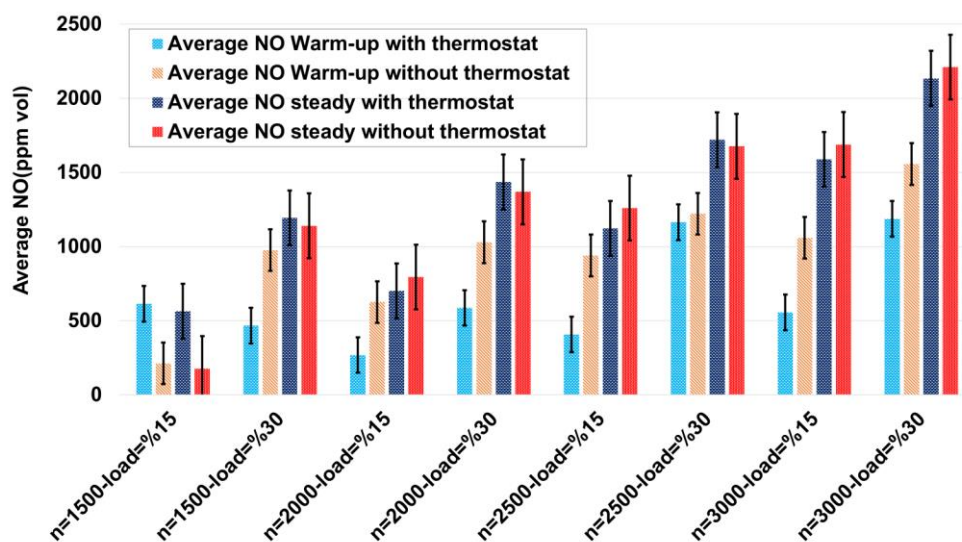
وابستگی مستقیمی بین انتشار اکسید ازت و حداکثر دمای گازهای درون استوانه وجود دارد. نمودار شکل ۱۱ مقادیر انتشار این متغیر را برای هر هشت آزمون نشان می‌دهد. در میان شش متغیر مورد بررسی، تنها اکسید ازت در تمامی آزمون‌ها مقادیر متفاوتی را نشان می‌دهد که بیانگر تأثیرپذیری قابل توجه آن از سرعت موتور، بار و سامانه خنک‌کننده است. همان‌طور که در نمودار مشاهده می‌شود، انتشار اکسید ازت در طول دوره گرم‌شدن نوسانات شدیدی دارد. در حالت پایدار، با افزایش دمای موتور، پیوندهای مولکول ازت (N_2) در محصولات احتراق شکسته شده و با اکسیژن واکنش داده و اکسید ازت تولید می‌کنند. محدوده تغییرات این آلاینده در کلیه آزمایش‌ها بسیار گسترده و در حدود ۲۵۰ تا ۲۵۰۰ ppm حجمی است. مهار حداکثر دمای موتور، کلید کاهش انتشار اکسید ازت محسوب می‌شود. انتشار اکسید ازت در طول دوره گرم‌شدن افزایش می‌یابد و پس از تثبیت شرایط موتور، با افزایش دور و بار به دلیل افزایش دمای احتراق، روند صعودی خود را ادامه می‌دهد. به عنوان مثال، دو برابر شدن دور موتور از ۱۵۰۰ به ۳۰۰۰ د.د.د.، موجب افزایش سه‌برابری اکسید ازت شد و دو برابر شدن بار نیز به طور متوسط افزایشی حدود ۱۶ برابری را در پی داشت.





شکل ۱۱ انتشار اکسید ازت از موتور در حالت الف) بدون دمايان، ب) با دمايان

به منظور بررسی تأثیر نصب دمايان بر انتشار اکسید ازت، میانگین این متغیر برای هر هشت آزمایش، هم در دوره گرم شدن و هم پس از آن، در دو حالت با و بدون دمايان محاسبه و در نمودار شکل ۱۲ ارائه شد. همان طور که مشاهده می شود، در پایین ترین سرعت و بار (۱۵۰۰ د.د.د. و بار ۱۵٪)، افزودن دمايان اگرچه زمان گرم شدن را کاهش داد، اما منجر به افزایش اکسید ازت در هر دو دوره (در حین و پس از گرم شدن) نسبت به حالت بدون دمايان گردید که احتمالاً به دلیل افزایش سریع تر دمای موتور است. با این حال، در سایر آزمایش ها، استفاده از دمايان با کوتاه کردن زمان گرم شدن، موجب کاهش انتشار اکسید ازت شد. از سوی دیگر، پس از دوره گرم شدن، حداکثر دمای سیال خنک کننده در حالت بدون دمايان افزایش می یابد.



شکل ۱۲ مقایسه میانگین انتشار اکسید ازت تولید شده در دوره گرم شدن و حالت پایدار موتور

۴- نتیجه گیری

در این پژوهش، تأثیر زمان گرم شدن موتور بر انتشار آلاینده‌ها با تأکید بر نقش دمایان و وابستگی نتایج به شرایط دور و بار موتور بررسی شد. یافته‌های کمی نشان داد که نصب دمایان در دور ۱۵۰۰ د.د. و بار ۱۵٪، زمان گرم شدن را به مقدار ۲۹٪ کاهش می‌دهد، همچنین افزایش دور موتور از ۱۵۰۰ به ۳۰۰۰ د.د. موجب افزایش تقریباً سه‌برابری اکسیدهای ازت می‌گردد، دو برابر شدن بار موتور به طور متوسط سبب افزایش ۱۶٪ برابری این آلاینده می‌شود، و افزایش دور موتور به ازای هر ۵۰۰ د.د.، زمان گرم شدن را به‌طور میانگین ۲۷٪ در بار ۱۵٪ و ۳۲٪ در بار ۳۰٪ کاهش می‌دهد. در اغلب شرایط کاری (بویژه دور و بار متوسط تا بالا)، نصب دمایان با کاهش زمان گرم شدن، منجر به کاهش چشمگیر آلاینده‌هایی نظیر HC، CO₂ و CO می‌گردد و پس از پایان دوره گرمایش، عملکرد موتور به شرایط پایدار و بهینه نزدیک می‌شود؛ با این حال، تأثیر دمایان بر انتشار اکسیدهای ازت یک قاعده مطلق نبوده و به نقطه عملکردی موتور وابسته است، به‌گونه‌ای که در شرایط دور و بار پایین (۱۵۰۰ د.د. و بار ۱۵٪)، گرمایش سریع‌تر ناشی از دمایان موجب افزایش حداکثر دمای استوانه در دوره گرمایش شده و در نتیجه انتشار اکسیدهای ازت را نسبت به حالت بدون دمایان افزایش می‌دهد، در حالی که در اغلب شرایط دیگر، کاهش زمان گرم شدن سبب کاهش انتشار تجمعی این آلاینده می‌گردد. بنابراین، نتیجه‌گیری نهایی به‌صورت شرطی و وابسته به شرایط کاری موتور بوده و نمی‌توان تأثیر مثبت یا منفی دمایان بر کاهش اکسیدهای ازت را به‌طور کلی برای تمام شرایط کاری موتور تعمیم داد؛ این نتایج اهمیت مدیریت هوشمند دوره گرمایش، بویژه در شرایط دور و بار پایین که با افزایش اکسیدهای ازت همراه است، را برای بهبود عملکرد زیست‌محیطی موتورهای احتراق داخلی مورد تأکید قرار می‌دهد.

References

- [1] Rahmatinejad B, Rahimi Asiabaraki H, Azimpour Shishevan F. Investigation of the effect of AL2O3 nanofluid in M13NI engine cooling system. The Journal of Engine Research. 2023 Mar 21;70(1):47-65. doi: 10.22034/er.2023.1975318.0
- [2] Ghasemi Zavaragh H. Optimization of the Cooling System of a Gasoline Internal Combustion Engine to Reduce Fuel Consumption and Exhaust Emissions. Karafan Journal. 2022 May 22;19(1):291-309. doi: 10.48301/kssa.2021.284665.1580
- [3] Nemati A, Nasiri S, Rahimi Asiabaraki H, Khanaki A. The Effect of Injection Timing and Phasing on the Emission of a Gasoline Single Cylinder Engine. The Journal of Engine Research. 2022 Feb 20;65(65):3-20. doi: 10.22034/er.2022.697903
- [4] Akbarian A, Najafi B. Investigation of dual fueled (Diesel-Natural Gas) diesel engine ignition delay in different loads, pilot injection timings and quantities. Iranian Journal of Mechanical Engineering Transactions of ISME. 2018 Aug 23;20(2):23-39.
- [5] Kaltakkıran G, Bakırcı K. An experimental approach of smart engine coolant thermal management strategy during engine warmup period. International Journal of Innovative Research and Reviews. 2021;5(2):78-85.
- [6] Shukhanov SN, Kuzmin AV, Polyakov GN, Sukhaeva AR, Kovalivnich VD. Influence of air temperature on warming up the engine of automotive vehicles. InIOP Conference Series: Earth and Environmental Science 2021 Mar 1 (Vol. 723, No. 5, p. 052003). IOP Publishing. doi: 10.1088/1755-1315/723/5/052003
- [7] Di Giovine G, Di Battista D, Cipollone R. The Effects of the Oil Temperature Warm-Up on Engine Fuel Consumption. SAE International Journal of Advances and Current Practices in Mobility. 2024 Apr 9;7(2024-01-2411):693-705. doi: 10.4271/2024-01-2411
- [8] Lee J, Lee J, Lee K. Improving Vehicle Warm-Up Performance Using Phase-Change Materials and Thermal Storage Methods. Energies. 2024 Sep 11;17(18):4556. doi: 10.3390/en17184556
- [9] Akansu SO, Tangöz S, Kahraman N, İlhak Mİ, Açıkgöz S. Experimental study of gasoline-ethanol-hydrogen blends combustion in an SI engine. International Journal of Hydrogen Energy. 2017 Oct 5;42(40):25781-90. doi: 10.1016/j.ijhydene.2017.07.014
- [10] Ghasemi Zavaragh H, Kaleli A, Solmuş İ, Afshari F. Experimental analysis and evaluation of thermostat effects on engine cooling system. Journal of Thermal Science. 2021 Mar;30(2):540-50. doi: 10.1007/s11630-020-1264-8

- [11] Rahmatinejad B, Rahimi Asiabaraki H, Azimpour Shishevan F, Mohtadi Bonab MA. Experimental analysis of the effect of using aluminum oxide nanofluid in improving the heat transfer of XU7 engine radiator. The Journal of Engine Research. 2023 Jun 22;70(2):66-79. doi: [10.22034/er.2023.2011671.1015](https://doi.org/10.22034/er.2023.2011671.1015)