



Engine encapsulation techniques for fuel consumption reduction under Iran's climatic conditions

Matin Samanian¹, MohammadAli Ehteram^{1*}, Hossein Bostan-Shirin²

1- Faculty of Mechanical and Energy Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

2- Irankhodro Powertrain Company (IPCo), Tehran, Iran

ARTICLE INFO

Keywords:

Thermal Encapsulation
Cold Start
Driving Cycle
Internal Friction
Fuel Consumption

ABSTRACT

Increasingly stringent regulatory demands for fuel consumption and emission reduction have made the investigation of engine thermal behavior during the cold-start phase a key focus of automotive engineering research. The drop in engine temperature after a shutdown period leads to increased lubricant viscosity and intensified internal friction, which significantly contribute to higher initial fuel consumption. In this study, the effect of a thermal engine encapsulation system on the thermal performance and fuel consumption of the EF7 Plus engine was quantitatively evaluated. To this end, a one-dimensional thermal model was developed in GT-SUITE and validated against experimental data provided by IPCO. By coupling the transient cool-down process with fuel consumption behavior over the standard New European Driving Cycle (NEDC), the model enabled a simultaneous analysis of the restart temperature and its impact on engine performance. The results indicate that retaining thermal energy during the soak period increases the initial restart temperature and consequently reduces frictional losses. Both cumulative and instantaneous fuel consumption analyses over the NEDC show that thermal encapsulation can reduce fuel consumption by up to 10% at an ambient temperature of 20°C and by up to 11.5% at 5°C. These findings demonstrate the technical and economic feasibility of implementing this technology in widely used domestically produced 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: m_ehteram@sbu.ac.ir (MA. Ehteram)

Received 29 November 2025; Accepted 3 August 2026

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

Cite this article: Samanian M, Ehteram MA, Bostan-Shirin H. Engine encapsulation techniques for fuel consumption reduction under Iran's climatic conditions. The Journal of Engine Research. 2026 Aug 23;73(2):44-62. doi: [10.22034/ER.2026.2077335.1118](https://doi.org/10.22034/ER.2026.2077335.1118)

استفاده از شرایط محصورسازی موتور با هدف کاهش مصرف سوخت در شرایط آب و هوایی ایران

متین سامانیان^۱، محمدعلی احترام^{۱*}، حسین بستان شیرین^۲

۱- دانشکده مهندسی مکانیک و انرژی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران
۲- شرکت تحقیق، طراحی و تولید موتور ایران خودرو (ایپکو)، تهران، ایران

اطلاعات مقاله	چکیده
کلیدواژه‌ها: محصورسازی حرارتی راهاندازی سرد چرخه‌راندگی اصطکاک داخلی مصرف سوخت	افزایش الزامات مبنی بر کاهش مصرف سوخت و آلاینده‌گی، بررسی رفتار حرارتی موتور در حالت راهاندازی سرد را به یکی از محورهای اصلی در پژوهش‌های مهندسی خودرو تبدیل کرده است. افت دمای موتور پس از دوره خاموشی، موجب افزایش گرانشی روغن و تشدید اصطکاک داخلی می‌شود که این امر سهم قابل‌توجهی در افزایش مصرف سوخت اولیه دارد. در این پژوهش، تأثیر سامانه محصورسازی حرارتی بر عملکرد حرارتی و مقدار مصرف سوخت موتور ملی نسل دوم به‌صورت کمی ارزیابی شده است. بدین منظور، یک الگوی حرارتی یک‌بعدی در نرم‌افزار جی‌تی‌سوئیت توسعه یافت و با استفاده از داده‌های تجربی شرکت ایپکو اعتبارسنجی شد. این الگو با متصل کردن فرآیند سرد شدن گذرا و رفتار مصرف سوخت در چرخه‌راندگی استاندارد اروپا، امکان تحلیل همزمان دمای راهاندازی مجدد و پیامدهای آن را بر عملکرد موتور فراهم آورد. نتایج نشان می‌دهد که حفظ انرژی گرمایی در دوره خاموشی، موجب افزایش دمای اولیه راهاندازی و در نتیجه، کاهش تلفات اصطکاکی می‌شود. تحلیل تجمعی و لحظه‌ای مصرف سوخت در چرخه اروپا حاکی از آن است که محصورسازی حرارتی می‌تواند مصرف سوخت را در دمای محیطی ۲۰ درجه سانتی‌گراد تا ۱۰٪ و در هوای ۵ درجه سانتی‌گراد، تا ۱۱.۵٪ کاهش دهد. این تحقیق، توجیه فنی و اقتصادی کاربرد فناوری مذکور را در موتورهای رایج داخلی اثبات 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: m_ehteram@sbu.ac.ir (محمدعلی احترام)

دریافت ۸ آذر ۱۴۰۴؛ پذیرش ۱۲ مرداد ۱۴۰۵

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

Cite this article: Samanian M, Ehteram MA, Bostan-Shirin H. Engine encapsulation techniques for fuel consumption reduction under Iran's climatic conditions. The Journal of Engine Research. 2026 Aug 23;73(2):44-62. doi: 10.22034/ER.2026.2077335.1118

۱- مقدمه

سخت‌گیرانه‌تر شدن الزامات مصرف سوخت و آلایندگی در صنعت خودرو، توسعه راهکارهای مؤثر برای بهبود بازده حرارتی موتورهای درون‌سوز را به یکی از محورهای اصلی پژوهش‌های مهندسی خودرو تبدیل کرده است. بخش قابل‌توجهی از مصرف سوخت و آلایندگی در خودروهای بنزینی، بویژه در رانندگی شهری، به حالت راه‌اندازی سرد و دوره گرم‌شدن اولیه موتور مربوط می‌شود؛ شرایطی که در آن، دمای پایین اجزای موتور موجب افزایش گرانشی روغن روانکار، تشدید اصطکاک داخلی و در نتیجه افزایش مصرف سوخت و انتشار آلاینده‌ها می‌شود. گزارش‌ها نشان می‌دهد که در این شرایط، مصرف انرژی می‌تواند تا ۱۱۰٪ و مقدار آلایندگی تا ۹۱۰٪ نسبت به شرایط پایدار افزایش یابد [۱].

عامل اصلی این افزایش، بالا بودن فشار متوسط مؤثر اصطکاکی^۱ (FMEP) در لحظات ابتدایی راه‌اندازی موتور است که مستقیماً تحت تأثیر دمای اولیه موتور و وضعیت حرارتی روغن قرار دارد. از این‌رو، مدیریت حرارتی موتور و کاهش افت دما پس از خاموشی، یکی از راهکارهای مهم برای کاهش پیامدهای نامطلوب راه‌اندازی سرد محسوب می‌شود.

محمدی و همکاران [۲] با بررسی اثر تغییر دور تلمبه آب در سامانه خنک‌کاری یک موتور تنفس طبیعی داخلی نشان دادند که مهار مناسب رفتار حرارتی موتور می‌تواند به کاهش هم‌زمان مصرف سوخت و آلاینده‌های خروجی منجر شود. همچنین یوان و همکاران [۳] در تحلیل چرخه‌رانندگی WLTP^۲ نشان دادند که افزایش دمای اولیه موتور در شروع حرکت، موجب کاهش توان اتلافی ناشی از اصطکاک و بهبود مصرف سوخت تجمعی می‌شود؛ به‌گونه‌ای که تنها با حفظ حرارت در یک دوره خاموشی ۹ ساعته، حدود ۱٪ بهبود مصرف سوخت حاصل شده است.

در این میان، محصورسازی حرارتی موتور به‌عنوان یکی از راهکارهای مؤثر مدیریت حرارتی، توجه ویژه‌ای را به خود جلب کرده است. در این فناوری، با استفاده از مواد عایق در اطراف بدنه موتور یا فضای محفظه موتور، نرخ اتلاف حرارت به محیط کاهش یافته و دمای موتور پس از خاموشی برای مدت طولانی‌تری حفظ می‌شود. این موضوع باعث افزایش دمای راه‌اندازی مجدد، کاهش گرانشی روغن، کاهش اصطکاک اولیه و در نهایت کاهش مصرف سوخت و آلایندگی می‌شود [۴]. افزون بر مزایای حرارتی، برخی مطالعات به اثرات جانبی مثبت این فناوری از جمله کاهش نویز و بهبود عملکرد آکوستیکی نیز اشاره کرده‌اند [۵].

همچنین با توجه به دمای بالای موتور، پوشش حرارتی می‌تواند تا دمای ۶۰ تا ۷۰ درجه سانتی‌گراد به واسطه حرارت موتور گرم شود [۶]. در این راستا کاپوتو و همکاران [۷] نیز در پژوهش خود، اهمیت انتخاب ماده مناسب برای سامانه محصورسازی حرارتی موتور را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که استفاده از مواد کامپوزیتی، به دلیل پایداری حرارتی و مقاومت مکانیکی مناسب در شرایط کاری موتور، می‌تواند گزینه‌ای قابل‌اطمینان برای عایق‌کاری حرارتی موتور باشد.

بر پایه این ملاحظات، پژوهش‌های متعددی اثربخشی عملی سامانه‌های محصورسازی حرارتی موتور را در شرایط بهره‌برداری واقعی مورد ارزیابی قرار داده‌اند. نتایج این مطالعات حاکی از آن است که حفظ انرژی حرارتی موتور پس از خاموشی، می‌تواند به بهبود عملکرد حرارتی و کاهش مصرف سوخت منجر شود، به‌طوری که پژوهشی عددی بر روی خودروی ولوو S80 تحت چرخه‌رانندگی WLTC^۳ اذعان کرد که محصورسازی ۹۷٪ موتور، دمای روغن را تا ۱۹ درجه سانتی‌گراد (در دمای محیط ۵ درجه) برای ۱۶ ساعت حفظ کرده است که در آزمون‌های چرخه‌رانندگی منجر به صرفه‌جویی ۲٫۵٪ در مصرف سوخت بعد از ۴ ساعت خاموشی موتور در این هوا و شروع مجدد آن، درمقایسه با همین فرآیند اما در حالت محصورسازی نشده شد. همچنین مینوسکی و همکاران نشان دادند که با محصورسازی ۹۰٪ نیز می‌تواند تا ۱٫۲۵٪ در مصرف سوخت صرفه‌جویی کرد [۴].

^۱ Friction Mean Effective Pressure

^۲ Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Procedure

^۳ Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Cycle

در پژوهشی دیگر، اوون و همکاران [۸] با همکاری شرکت جگوار لندور، ضمن بررسی نمونه‌های موفق محصورسازی حرارتی در شرکت‌های مختلف خودروسازی، نشان دادند که حتی در شرایطی که موتور پس از یک دوره خاموشی^۱ طولانی به‌طور کامل سرد شده باشد، استفاده از سامانه محصورسازی می‌تواند زمان رسیدن موتور به دمای کاری را نسبت به حالت معمولی به‌طور محسوسی کاهش دهد. این تسریع در گرم‌شدن موتور، حتی در حالت راه‌اندازی کاملاً سرد، منجر به کاهش مصرف سوخت خودرو در طول چرخه‌رانندگی می‌شود.

با توجه به عملکرد قابل‌توجه سامانه‌های محصورسازی حرارتی در شرایط مختلف کاری، ساختار و نحوه استقرار این سامانه‌ها نیز به‌عنوان یکی از عوامل اثرگذار بررسی شد. در این راستا محصورسازی را می‌توان به سه دسته (نصب‌شده بر موتور، نصب‌شده بر بدنه و ترکیبی این دو حالت) تقسیم کرد. مطالعات نشان داده‌اند، محصورسازی نصب‌شده بر بدنه، به دلیل پوشش اجزای بیشتر، می‌تواند گرمای بیشتری را طی یک دوره ۹ ساعته حفظ کند [۹]. در شکل ۱ دو نوع محصورسازی نمایش داده شده است.



(الف)



(ب)

شکل ۱ محصورسازی موتور: الف) محصورسازی نصب شده بر روی بدنه، ب) محصورسازی نصب شده روی موتور [۱۰]

با وجود ارزش علمی مطالعات پیشین، بیشتر این پژوهش‌ها بر خودروهای خارجی، چرخه‌های WLTP و WLTC و شرایط اقلیمی غیربومی متمرکز بوده‌اند و تحلیل مستقیمی برای روی موتور تحت چرخه استاندارد اروپا^۲ (به عنوان مرجع اصلی آزمون‌های مصرف سوخت داخلی) ارائه نشده است. همچنین در اغلب این مطالعات، فرآیند سردشدن موتور، رفتار اصطکاک وابسته به دما و اثر مستقیم آن بر مصرف سوخت به‌صورت مجزا بررسی شده‌اند و یک چارچوب یکپارچه برای اتصال هم‌زمان این سه بخش کمتر مشاهده می‌شود. بویژه، تحلیل کمی ارتباط میان رفتار گذرای افت دمای موتور پس از خاموشی، اصلاح نقشه FMEP وابسته به دما و تأثیر مستقیم آن بر مصرف سوخت تجمعی در شرایط اقلیمی ایران، همچنان به‌عنوان یک خلأ پژوهشی قابل‌توجه باقی مانده است.

¹ Soak Time

² New European Driving Cycle (NEDC)

بر همین اساس، هدف اصلی این پژوهش، ارزیابی کمی اثر سامانه محصورسازی حرارتی بر مصرف سوخت موتور ملی نسل دوم^۱ تحت شرایط اقلیمی ایران و چرخه اروپا است. در این راستا، یک الگوی یک‌بعدی در محیط نرم‌افزار جی‌تی‌سوئیت^۲ توسعه داده شد که شامل الگوی خودرو، موتور نقشه‌محور^۳ و سامانه خنک‌کاری است. برای تحلیل دقیق‌تر رفتار حرارتی، یک الگوی مقاومت حرارتی سری برای سامانه محصورسازی توسعه یافت و با الگوی حرارتی توده‌متمرکز^۴ سه‌جرمی موتور متصل شد تا فرآیند سرد شدن گذرا و دمای راه‌اندازی مجدد با دقت مناسبی بازنمایی شود. سپس با اعمال الگوی اصلاح FMEP وابسته به دما، اثر مستقیم این تغییرات حرارتی بر مصرف سوخت چرخه اروپا تحلیل شد.

در همین راستا، نوآوری اصلی پژوهش حاضر توسعه و پیاده‌سازی یک رویکرد ترکیبی (الگوی مقاومت حرارتی سری و توده‌متمرکز) در بستر شبیه‌سازی یک‌بعدی است. این روش به عنوان یک ابزار کارآمد برای ارزیابی سریع و دقیق اثرات ضخامت و جنس عایق بر رفتار حرارتی موتور توسعه یافته است. برای اثبات کارایی و اعتبارسنجی این روش، موتور ملی نسل دوم به عنوان یک مطالعه موردی انتخاب شده است تا تأثیر این روش بر کاهش اتلافات حرارتی و بهبود مصرف سوخت در شرایط عملکردی واقعی ارزیابی شود.

در ادامه، ابتدا مشخصات موتور و روش توسعه الگوی پایه ارائه می‌شود. سپس فرآیند اعتبارسنجی الگو با استفاده از داده‌های تجربی شرکت ایپکو تشریح شده و روش‌های مختلف محصورسازی حرارتی تعریف می‌شوند. در نهایت، نتایج حاصل از اتصال رفتار حرارتی و مصرف سوخت مورد تحلیل قرار گرفته و مسیر توسعه الگوهای جامع‌تر شامل تحلیل رفتار گذرای روغن موتور و آلایندگی‌های خروجی در مطالعات آینده پیشنهاد می‌شود.

۲- مواد و روش‌ها

در این بخش، الگوی پایه‌ای توسعه داده می‌شود تا با اعمال تنظیم‌های لازم به زمینه‌ای برای محصورسازی حرارتی با ایجاد تغییرات لازمه تبدیل شود. بنابراین در ابتدا نیاز هست الگوی کلی خودرویی در فضای نرم‌افزار جی‌تی‌سوئیت ایجاد و شخصی‌سازی شود. در این راستا یکی از الگوهای مثال‌های پیش‌فرض خود نرم‌افزار به کار گرفته می‌شود که به نیاز و پژوهش محصورسازی می‌تواند بسیار نزدیک باشد. (شکل ۲)

در این پژوهش، به‌منظور پیش‌بینی مصرف سوخت در یک چرخه‌رانندگی گذرا، یک الگوی یکپارچه شامل ۳ زیرالگو بخش موتور و احتراق، بخش خودرو شامل سامانه انتقال قدرت (مقسم^۵ و جعبه دنده) و بخش سامانه خنک‌کاری در محیط نرم‌افزار جی‌تی‌سوئیت توسعه داده شد. زیرالگو خودرو با دریافت چرخه اروپا، سرعت و بار لحظه‌ای موتور را محاسبه نموده و این مقادیر را به الگوی موتور منتقل می‌کند. الگوی موتور، که بر پایه نقشه‌های عملکردی ملی نسل دوم با داده‌های تجربی شرکت ایپکو توسعه یافته است، بر اساس دور و بار موتور، مقدار مصرف سوخت و همچنین نرخ گرمای دفع‌شده^۶ به سامانه خنک‌کاری را تعیین می‌نماید. گرمای دفع‌شده به مایع خنک‌کننده از طریق ساختار حرارتی ساده‌شده بدنه موتور اعمال شده است. این ساختار بر مبنای الگوی توده‌متمرکز سه‌جرمی (شامل جرم داخلی، جرم بدنه و جرم بستار) پیاده‌سازی شده تا رفتار گذرای گرم شدن و سرد شدن موتور با دقت مناسبی بازنمایی شود. بدین ترتیب، امکان تحلیل همزمان عملکرد حرارتی موتور و مصرف سوخت در شرایط محیطی مختلف فراهم گردیده است.

بدیهی است که به‌منظور راه‌اندازی و تنظیم صحیح الگوی یکپارچه، لازم است ابتدا مشخصات کلی موتور به‌صورت دقیق در محیط شبیه‌سازی تعریف و اعمال شوند تا پایه شبیه‌سازی در راستای موتور ملی نسل دوم قرار بگیرد. سپس بعد

¹ EF7+

² GT-SUITE

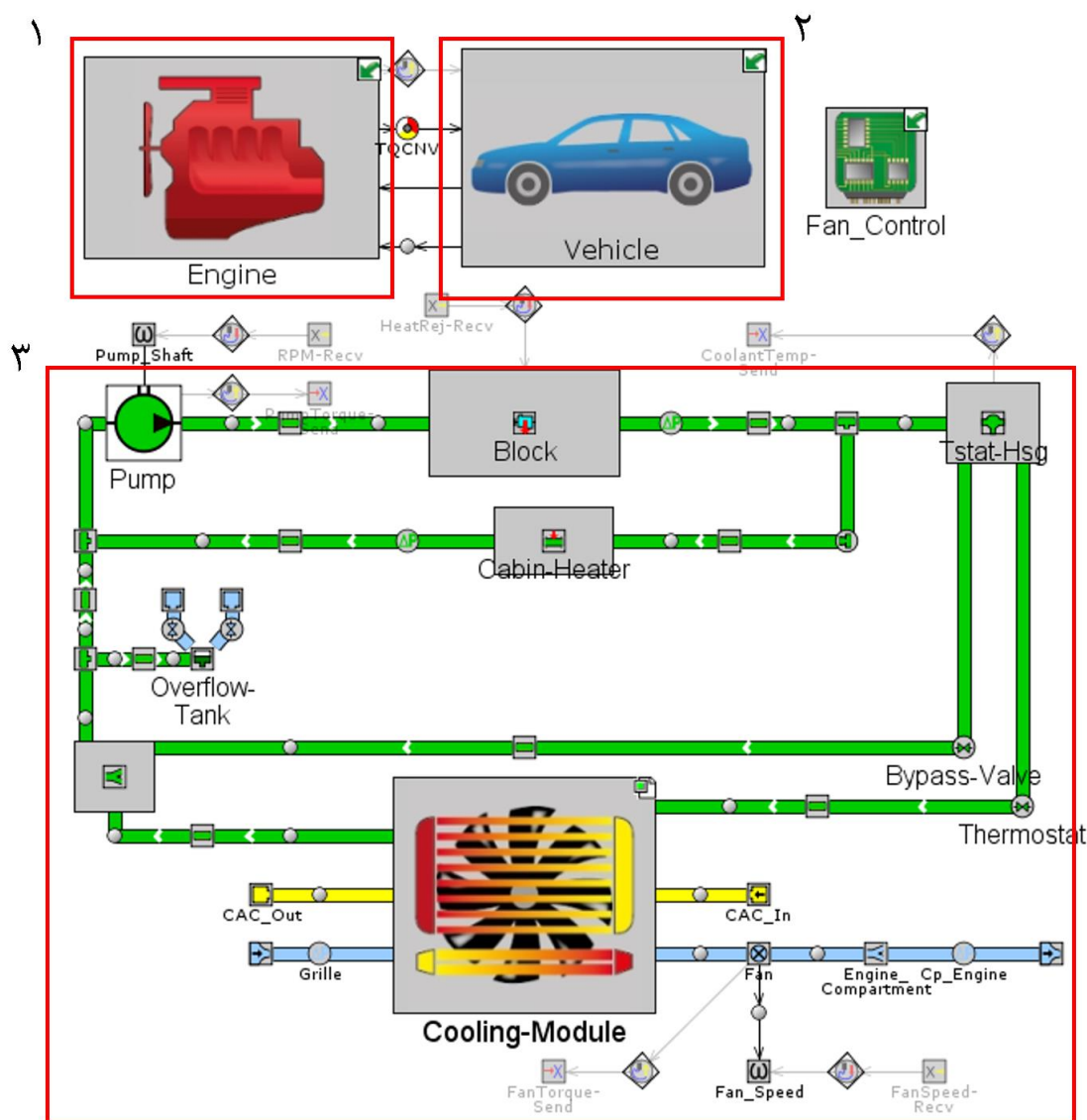
³ Map-Based Engine

⁴ Lumped Capacitance Model

⁵ Automotive Differential

⁶ Heat Rejection Rate

از آن، اطلاعات و داده‌های مورد نیاز که توسط اپیکو جمع‌آوری شده است، برای انجام پروژه به همراه جزئیات آن‌ها در هر زیر الگو به صورت جداگانه وارد شود. این دو موضوع در بخش‌های بعدی به طور کامل توضیح داده شده است.



شکل ۲ شماتیک کلی الگو در نرم‌افزار همراه با ۳ بخش اصلی

۲-۱- مشخصات خودرو

موتور ملی نسل دوم، پایه و اساس الگوسازی عددی محصورسازی حرارتی است. این موتور چهاراستوانه بنزینی به عنوان یکی از پرکاربردترین موتورهای در بازار خودروی داخلی، انتخاب شده است که مجهز به سامانه تزریق سوخت الکترونیکی بوده و با نسبت تراکم مناسبی طراحی شده است. همچنین دلیل این انتخاب، علاوه بر اهمیت کاربردی این موتور در ناوگان خودرویی کشور، دسترسی به داده‌های تجربی معتبر اپیکو برای اعتبارسنجی الگو بود. به منظور تکمیل الگوی خودرو، کفی^۱ خودروی دنا با جعبه‌دنده ۶ سرعته دستی و مقسم جلو به عنوان مبنای سامانه انتقال قدرت انتخاب شد. در جدول ۱ مشخصات کلی موتور نمایش داده شده است.

¹ Platform

جدول ۱ مشخصات موتور ملی نسل دوم

نام مشخصه	مقدار مشخصه
تعداد دریچه	۱۶
حجم موتور (سی سی)	۱۶۴۸
حداکثر توان موتور (اسب بخار)	۱۱۵
حداکثر گشتاور تولیدی (نیوتن متر)	۱۵۵
نسبت تراکم	۹٫۵:۱
استاندارد آلایندگی	یورو ۴

۲-۲- جمع آوری داده‌های تجربی برای شبیه‌سازی الگو پایه

برای اجرای شبیه‌سازی در نرم‌افزار جیتی سوئیت، ابتدا مشخصات فنی موتور و خودرو (بخش ۲-۱) به عنوان پایه الگو تعریف شد. سپس برای تطابق دقیق شبیه‌سازی با موتور واقعی، داده‌های تجربی تکمیلی (شامل اطلاعات رایانه موتور در آزمون‌های عملیاتی و داده‌های نقشه‌محور موتور) با همکاری شرکت ایپکو تهیه گردید. شبیه‌سازی محصورسازی حرارتی، مطابق شکل ۲، نیازمند تعریف سه سامانه مرتبط است که هرکدام برای تنظیم و شبیه‌سازی عملکرد واقعی، به داده‌های اختصاصی نیاز دارند. این سه سامانه و داده‌های موردنیاز آن‌ها در زیربخش‌های آتی به تفصیل بررسی خواهند شد.

(الف) سامانه موتور و احتراق

سامانه حیاتی اول، الگوی موتور و احتراق (پنجره ۱ در شکل ۲)، با مجموعه‌ای از داده‌های تجربی استخراج شده از آزمون‌های عملیاتی ایپکو شکل گرفت. این داده‌ها شامل نقشه فشار متوسط مؤثر ترمزی^۱، نقشه مصرف سوخت^۲، نقشه فشار متوسط مؤثر اصطکاکی (FMEP)، همچنین نرخ جریان هوای ورودی^۳، گرمای دفع شده به سامانه خنک‌کاری، منحنی گرم‌شدن موتور، منحنی سردشدن پس از خاموشی، و داده‌های مصرف سوخت در چرخه اروپا بودند. لازم به ذکر است، تمامی نقشه‌های عملکردی در این پژوهش، در شرایط دمایی کاملاً گرم^۴ موتور (در حدود ۹۰ درجه سانتی‌گراد دمای مایع خنک‌کننده) استخراج شده‌اند و برای تحلیل شرایط راه‌اندازی سرد، نیاز به اعمال ضرایب اصلاحی وابسته به دما وجود داشت که در بخش اعتبارسنجی تشریح می‌شود.

ورودی‌های الگوسازی به صورت سلسله مراتبی تعریف شدند:

- ابتدا، نقشه فشار متوسط مؤثر ترمزی بر اساس موقعیت اهرم گاز و دور موتور تعریف گردید. این نقشه، نگاشت بار ترمزی موتور را در بازه دوری ۱۰۰۰ تا ۶۰۰۰ دور در دقیقه ارائه می‌کند؛ به گونه‌ای که بر اساس درصد فشرده‌شدن اهرم گاز (یا مقدار بازشدگی دریچه هوا)، مقادیر متناظر بار ترمزی تولید و در نقشه اعمال شده است. نمودار ۳ بعدی این نقشه در شکل ۳-الف آمده است.
- سپس، نقشه مصرف سوخت، نقشه فشار متوسط مؤثر اصطکاکی^۵، همچنین نرخ جریان هوای ورودی همگی بر اساس فشار متوسط مؤثر ترمزی (بار) تعریف شده و دور موتور به الگو وارد شدند. این نقشه‌ها که در شکل ۳-ب، ۳-ج، ۳-د، آمده است، به شبیه‌سازی کمک می‌کند تا همانند موتور حقیقی هوا را وارد موتور، سوخت را مصرف و توان خروجی را اعلام کند.

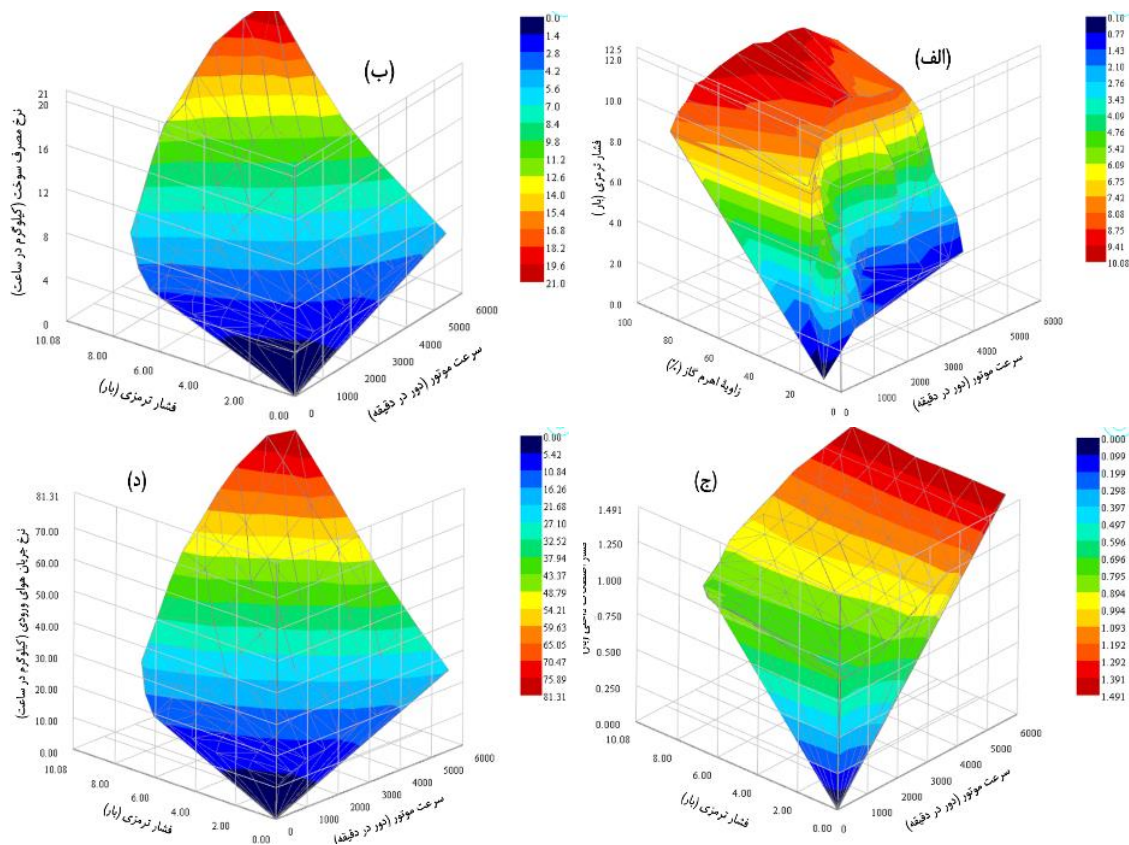
¹ Brake Mean Effective Pressure (BMEP)

² Fuel Consumption Map

³ Air Flow Map

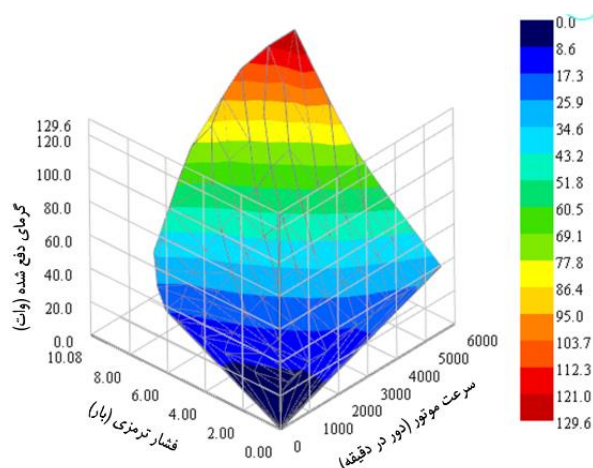
⁴ Full Warm

⁵ Engine Friction Map



شکل ۳ نمودارهای نقشه عملکردی موتور: (الف) نقشه عملکردی فشار ترمزی در واحد بار، (ب) نقشه مصرف سوخت، (ج) نقشه فشار اصطکاک داخلی، (د) نقشه جریان هوای ورودی

- در نهایت، نقشه گرمای دفع شده^۱ (شکل ۴) به صورت تنظیم شده (بر اساس توان اتلافی) تنظیم شد تا تطابق نتایج شبیه سازی با دمای گرم شدن^۲ موتور در ابتدای شروع و سرد شدن واقعی موتور تضمین گردد، که جزئیات آن در بخش اعتبارسنجی ارائه می شود.



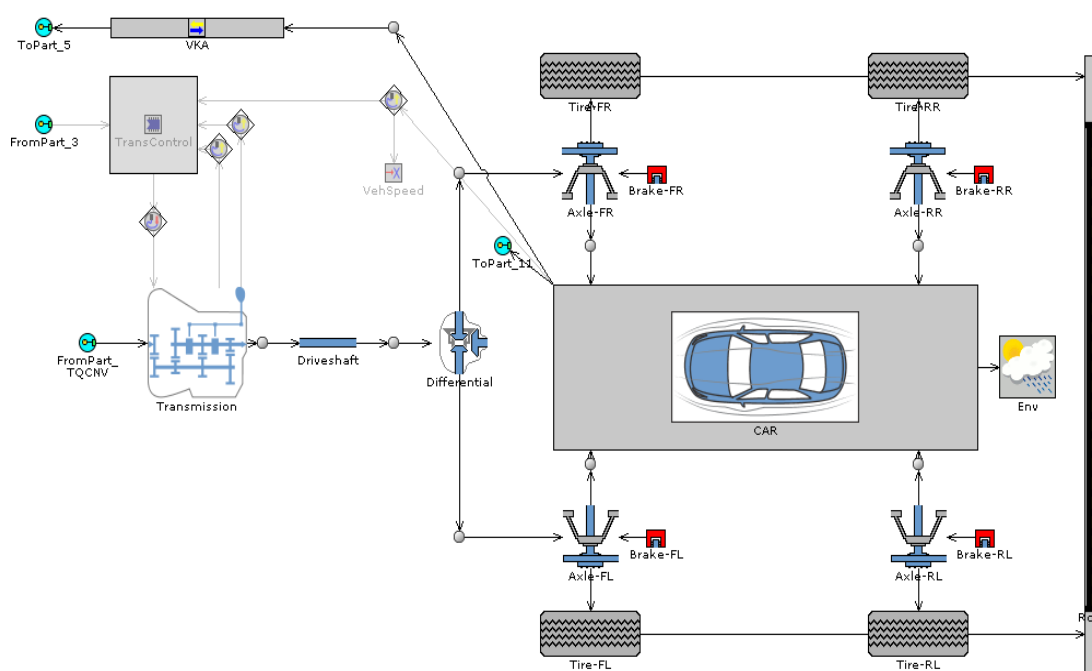
شکل ۴ نقشه گرمای دفع شده

¹ Heat Rejection Map

² Warm Up Temperature

(ب) سامانه انتقال قدرت

سامانه دوم مورد نیاز برای الگوسازی دینامیکی کامل خودرو، مربوط به الگوی سامانه انتقال قدرت است. این بخش که: طرح کلی آن به عنوان (بخش ۲ در شکل ۲) نشان داده شده است، شامل جعبه دنده، محورها، کفی خودرو و چرخ‌ها می‌باشد. شکل ۵ جزئیات و محیط داخلی این زیرالگو، شامل تنظیمات مقسم و خودرو را، نمایش می‌دهد.



شکل ۵ طرح سامانه انتقال قدرت

با توجه به اینکه خودروهای مجهز به موتور ملی نسل دوم از آرایش مقسم جلو بهره می‌برند، الگوسازی نیز بر اساس این پیکربندی انجام شد. برای اطمینان از صحت تحلیل ساختاری، متغیرهای ابعادی و وزنی کلیدی خودرو، که بر اساس کفی خودروی دنا استخراج شده‌اند، مطابق جدول ۲ در الگو وارد شدند.

جدول ۲ مشخصات فیزیکی خودرو بر مبنای کفی دنا

وزن کلی خودرو (kg)	فاصله بین دو محور (mm)	قطر موثر چرخ (mm)
۱۲۶۶	۲۶۷۱	۳۰۰

علاوه بر این، مشخصات فنی جعبه دنده ۶ سرعته دستی، شامل ضرایب دنده‌ها و ضریب نهایی مقسم، به صورت دقیق مطابق با داده‌های شرکت ایپکو تنظیم گردید تا با خطا نداشتن در این مرحله از مصرف بنزین بیشتر به دلیل ضرایب دنده نامناسب جلوگیری شود [۱۱]. (جدول ۳).

برای دستیابی به عملکرد واقعی، دینامیک و زمان‌بندی تعویض دنده نیز بر اساس داده‌های تجربی ایپکو تنظیم شد. در نهایت، چرخه اروپا برای تحلیل انتخاب گردید. دلیل این انتخاب، در دسترس بودن داده‌های تجربی مصرف سوخت ملی نسل دوم (ارائه شده توسط ایپکو) دقیقاً برای همین چرخه بود، که این امر نقش حیاتی در فرآیند اعتبارسنجی الگو ایفا می‌کند.

جدول ۳ ضرایب دنده و ضریب نهایی مقسم^۱ (جعبه دنده ۶ سرعته دستی)

شماره دنده	ضریب دنده
دنده ۱	۳,۵۸۳
دنده ۲	۲,۰۴۷۶
دنده ۳	۱,۲۹۰۳
دنده ۴	۰,۹۷۵
دنده ۵	۰,۷۶۰۹
دنده ۶	۰,۶۰۳۸
دنده مقسم ^۱	۴,۲۹

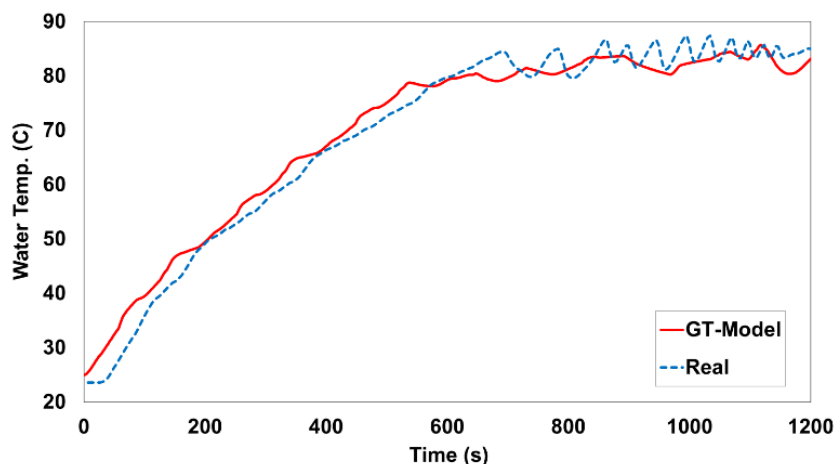
(ج) سامانه حرارتی و خنک‌کاری

سومین بخش از الگوسازی کامل خودرو، مربوط به سامانه حرارتی و خنک‌کاری است که وظیفه حفظ و تأمین دمای حرارتی موتور را بر عهده دارد (بخش ۳ در شکل ۲). برای اطمینان از صحت شبیه‌سازی حرارتی، متغیرهای فیزیکی و حرارتی بدنه (جنس چدنی) و بستار (جنس آلومینیومی)، شامل جرم، مساحت سطح خارجی و ظرفیت گرمایی، به‌دقت وارد الگو شدند. همچنین، مایع خنک‌کننده به‌عنوان یک مایع استاندارد تعریف شده و شرایط مرزی دمای ابتدایی موتور تنظیم گردید. برای تنظیم کردن مصرف سوخت الگو پایه (بدون محصورسازی)، تنظیمات شبیه‌سازی در چرخه اروپا در دمای محیطی ۲۰ درجه سانتی گراد اعمال شد. در این راستا، ضریب انتقال حرارت جابجایی^۱ سطح خارجی بدنه، به‌عنوان متغیر کلیدی، تنظیم شد تا روند سرد شدن موتور (کاهش دمای مایع خنک‌کن) در شبیه‌سازی، کاملاً با داده‌های واقعی ایپکو تطابق یابد. جزئیات این تنظیم حرارتی، در بخش آتی ارائه خواهد شد.

۲-۳- اعتبارسنجی و تنظیم الگو

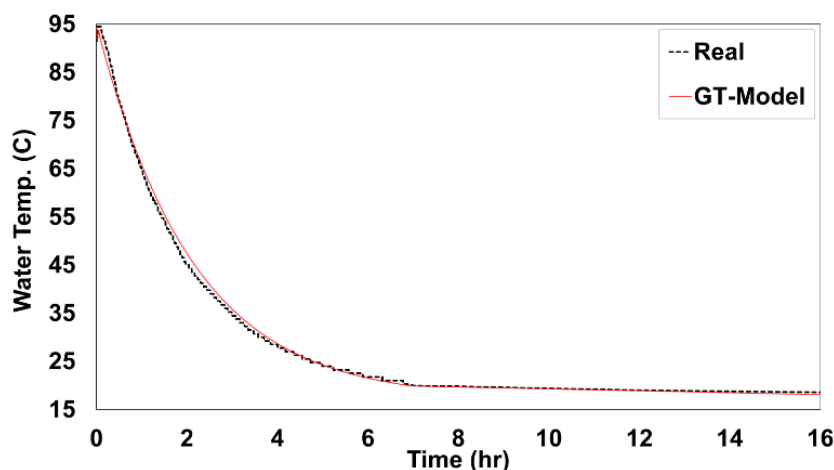
پس از توسعه الگوی پایه، اعتبارسنجی و تنظیم آن بر اساس داده‌های تجربی ایپکو انجام شد تا اطمینان حاصل شود که الگوی عددی، رفتار واقعی موتور را با دقت مناسبی بازنمایی می‌کند. این فرآیند در سه مرحله اصلی شامل گرم‌شدن موتور، سردشدن پس از خاموشی، و مصرف سوخت چرخه اروپا انجام شد. (الف) تنظیم گرم‌شدن موتور: مرحله نخست، تطبیق منحنی گرم‌شدن موتور حین راه‌اندازی سرد در شبیه‌سازی با داده‌های واقعی بود. همان‌طور که در بخش قبلی اشاره شد، نقشه گرمای دفع‌شده به‌گونه‌ای تنظیم شد که دمای مایع خنک‌کننده در طول اجرای چرخه‌رانندگی، روندی مشابه با داده‌های تجربی ایپکو داشته باشد. برای این موضوع با دمای محیطی ۲۵ درجه در چرخه اروپا روند تحلیل و شبیه‌سازی گرم‌شدن موتور بر روی الگو آغاز شد و روند آن در این بازه زمانی ۱۲۰۰ ثانیه‌ای چرخه به‌دست آمد. سپس نتیجه گرم‌شدن الگو با موتور در حالت واقعی، تطبیق داده شد که بعد از تنظیم گرمای دفع‌شده، این دو منحنی تطابق بیشتر و روند یکسانی را سپری کنند. همان‌طور که در شکل ۶ مشخص است دو نمودار با تفاوت محسوسی نسبت به هم روند نزدیکی را تجربه می‌کنند که از دمای محیط یا دمای ابتدایی موتور تا دمای کاری آن پیش بروند. لازم به ذکر است که صرفاً این مؤلفه نیاز به تنظیم در دمای مذکور داشت و سایر متغیرهای الگو در شرایط ۲۰ درجه سانتی گراد حفظ شدند.

¹ Convection Heat Transfer Coefficient



شکل ۶ منحنی گرم شدن واقعی موتور و الگوسازی شده

(ب) تنظیم سرد شدن: در مرحله دوم، رفتار افت دمای موتور پس از خاموشی مورد اعتبارسنجی قرار گرفت. در این بخش، ضریب انتقال حرارت جابجایی سطح خارجی بدنه موتور به عنوان مهم ترین متغیر تنظیم انتخاب شد تا منحنی سرد شدن شبیه سازی شده با داده های واقعی ایپکو منطبق گردد. شبیه سازی با فرض دمای اولیه ۹۴٫۵ درجه سانتی گراد آغاز شد و فرآیند سرد شدن موتور در بازه زمانی ۱۶ ساعته در دمای محیط ۲۰ درجه سانتی گراد بررسی شد. انطباق مناسب نتایج شبیه سازی با داده های تجربی، مبنای اصلی تحلیل سامانه محصورسازی حرارتی را فراهم ساخت. از این رو شکل ۷ کاملاً بر تنظیم سرد شدن موتور گواهی می دهد.

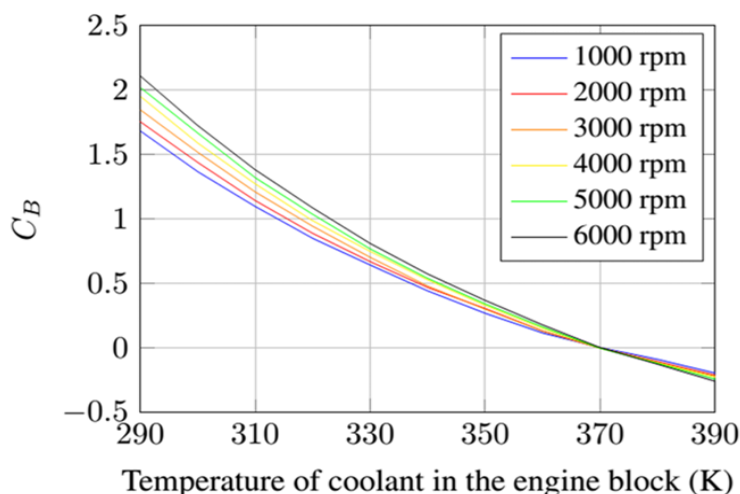


شکل ۷ منحنی سرد شدن آب موتور در حالت واقعی و الگوسازی شده در طول ۱۶ ساعت

(ج) تنظیم مصرف سوخت و اصطکاک موتوری اولیه: مرحله نهایی، اعتبارسنجی مصرف سوخت تجمعی در چرخه اروپا بود. برای شبیه سازی صحیح شرایط راه اندازی سرد لازم بود اثر افزایش گرانیروی روغن و افزایش اصطکاک اولیه در دماهای پایین لحاظ شود. از آنجا که نقشه FMEP مورد استفاده در الگوی موتور در شرایط دمای کاری کامل استخراج شده بود، از یک ضریب اصلاحی وابسته به دما و دور موتور برای افزایش موقت مقادیر FMEP در لحظات اولیه روشن شدن موتور استفاده شد. بدین منظور، از یک ضریب اصلاحی C_B وابسته به دما و دور موتور (شکل ۸)، برای افزایش موقت مقادیر FMEP در لحظات اولیه روشن شدن موتور استفاده شد. سازوکار این تصحیح در رابطه (۱) ارائه شده است.

$$FMEP_{corrected} = (1 + C_B) \times FMEP_{@T=90^{\circ}C} \quad (1)$$

همچنین از آنجا که C_B بیانگر سهم اضافی $FMEP$ در دمای نامی به دلیل افزایش گرانیوی روغن است، در شکل ۸ مشخص می‌شود، با افزایش دما کاهش می‌یابد و در عین حال به طور مستقیم با دور موتور متناسب است. این ضریب اصلاحی، که بر اساس مطالعات مینوفسکی و همکاران [۴] و ساختار پیش فرض نرم افزار جی تی سوئیت تعریف شد، سهم اضافی اصطکاک ناشی از افزایش گرانیوی روغن را در دماهای پایین بازنمایی می‌کند.



شکل ۸ ضریب برای تصحیح فشار موثر اصطکاکی [۴]

حال با اعمال این تنظیم می‌توان اجرای چرخه اروپا را در دماهای مختلف، همانند آزمون‌های شرکت ایپکو شبیه‌سازی کرد. نتایج مصرف سوخت تجمعی الگوی شبیه‌سازی شده در مسافت ۱۱ کیلومتری چرخه و ۲۰ دقیقه‌ای آن به ۷٫۵ لیتر در ۱۰۰ کیلومتر رسید. این عدد، نزدیکی خوبی با داده‌های آزمون ارتعاش^۱ ایپکو (که مصرف ۷٫۶ لیتر در ۱۰۰ کیلومتر را در شرایط مشابه ثبت کرده بود) نشان می‌دهد و بدین ترتیب، اعتبار الگوی پایه برای انجام تحلیل‌های بعدی و اعمال تغییرات برای محصورسازی تأیید می‌گردد.

لازم به توضیح است که در این پژوهش، تمرکز اصلی بر تحلیل دمای مایع خنک‌کننده قرار گرفت و الگوسازی گذرای دمای روغن موتور به صورت مستقیم انجام نشد. دلیل این موضوع، عدم دسترسی به داده‌های تجربی معتبر برای اعتبارسنجی رفتار گذرای روغن موتور در شرایط مورد مطالعه بود. از آنجا که هدف اصلی پژوهش، ارائه یک الگوی کمی قابل اتکا و قابل اعتبارسنجی بود، از توسعه الگویی بدون پشتوانه تجربی برای روغن موتور اجتناب شد. با این حال، اثر دمای روغن به صورت غیرمستقیم از طریق اصلاح نقشه $FMEP$ وابسته به دما در تحلیل لحاظ گردید.

۲-۴- شبیه‌سازی محصورسازی حرارتی موتور

پس از اعتبارسازی کامل الگوی پایه، شبیه‌سازی اثر محصورسازی حرارتی با توسعه یک الگوی مقاومتی حرارتی با وفاداری بالا انجام شد. روش‌شناسی این پژوهش بر پایه الگوسازی ظرفیت متمرکز^۲ برای اجزای داخلی موتور و الگوسازی مقاومت‌های حرارتی سری برای اتلاف حرارت به محیط خارجی استوار است. در چارچوب الگوی ظرفیت متمرکز، موازنه انرژی گذرای بدنه موتور به دین صورت بیان می‌شود [۱۲، ۱۳]:

¹ Modal Test

² Lumped Capacity

$$mc_p \frac{dT}{dt} = -\dot{Q} \quad (2)$$

که در آن m جرم مؤثر، c_p گرمای ویژه و $\dot{Q}$ نرخ انتقال حرارت به محیط است. برای دستیابی به الگوسازی سری، یک الگوی تحلیلی شامل سه مقاومت حرارتی مجزا به صورت سری برای شرایط انتقال حرارت موتور توسعه داده شد:

- مقاومت فاصله هوایی بین بدنه موتور و عایق شامل اثرات ترکیبی هدایت، جابجایی و تشعشع داخلی
- مقاومت هدایتی فوم الاستومری برای محصورسازی که به صورت زیر بیان می شود:

$$R_{foam} = \frac{L_{foam}}{k_{foam}A} \quad (3)$$

سامانه محصورسازی انتخابی بر اساس فوم الاستومری با ضخامت ۶ میلی متر و ضریب هدایت حرارتی در محدوده $\frac{W}{m.k}$ ۰.۰۴ الگوسازی شد. وجود پوشش آلومینیومی در یک سمت عایق، به دلیل گسیلندگی پایین فلزات براق، موجب کاهش مؤثر انتقال حرارت تشعشعی و در نتیجه افزایش مقاومت حرارتی مؤثر سطح خارجی گردید.

- مقاومت سطح خارجی شامل جابجایی و تشعشع به هوای محیط محفظه موتور که به صورت زیر تعریف می شود:

$$R_{ext} = \frac{1}{(h_{conv} + h_{rad})A} \quad (4)$$

که در آن ضریب انتقال حرارت تشعشعی به صورت خطی شده از رابطه زیر محاسبه می شود:

$$h_{rad} = \varepsilon \sigma (T_s + T_{\infty})(T_s^2 + T_{\infty}^2) \quad (5)$$

وجود پوشش آلومینیومی در یک سمت عایق، به دلیل گسیلندگی پایین فلزات براق، موجب کاهش مؤثر انتقال حرارت تشعشعی و در نتیجه افزایش مقاومت حرارتی مؤثر سطح خارجی گردید.

حال با در نظر گرفتن الگوی مقاومتی سری برای لایه های محصورسازی، نرخ انتقال حرارت به صورت زیر تعریف می شود:

$$\dot{Q} = \frac{T_{engine} - T_{\infty}}{R_{tot}} \quad (6)$$

که در آن مقاومت کل برابر است با:

$$R_{tot} = R_{gap} + R_{foam} + R_{ext} \quad (7)$$

هدف از این الگوی تحلیلی، تبدیل خواص فیزیکی عایق به یک متغیر مؤثر واحد، یعنی ضریب انتقال حرارت معادل بود که از رابطه زیر به دست می آید:

$$U_{eq} = \frac{1}{R_{tot}} \quad (8)$$

پس از محاسبه مقاومت کل سامانه و ضریب انتقال حرارت معادل، این متغیر در زیرالگوی بدنه موتور در محیط جی تی سوئیت اعمال شد تا فرآیند رفتار حرارتی موتور را در راهکارهای مختلف محصورسازی و چرخه های رانندگی مورد ارزیابی قرار گیرد.

(الف) روش سرد شدن موتور: اولین راهکار، بر روی فرآیند سرد شدن موتور پس از خاموشی تمرکز دارد و عملکرد عایق کاری را به صورت دینامیک گذرا ارزیابی می کند. بنابراین معادله گذرای حاکم بر سرد شدن موتور با مساوی قرار دادن معادله (۱) و معادله (۴) به صورت زیر می تواند بازنویسی شود:

$$mc_p \frac{dT}{dt} = -\frac{T_{engine} - T_{\infty}}{R_{tot}} \quad (9)$$

که حل تحلیلی این معادله، رفتار نمایی کاهش دما و هم گرایی تدریجی دمای موتور به دمای محیط را نشان می دهد:

$$T(t) = T_{\infty} + (T_0 - T_{\infty}) \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \quad (10)$$

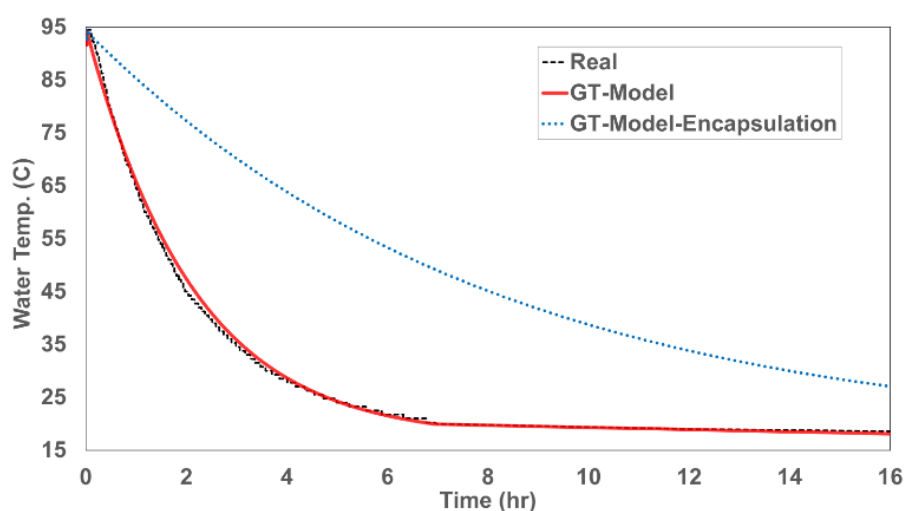
و در آن ثابت زمانی سامانه به صورت زیر تعریف می شود:

$$\tau = mc_p R_{tot} \quad (11)$$

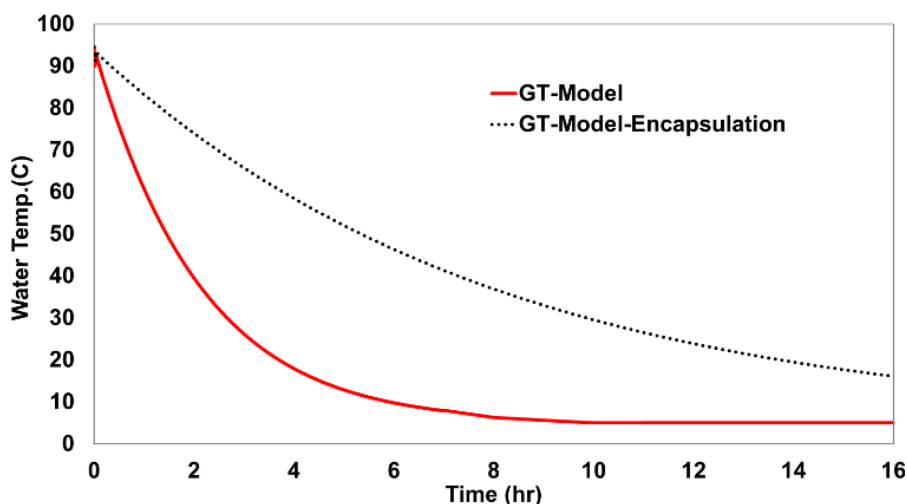
از این رو الگوسازی بر پایه ظرفیت متمرکز در حالت گذرا، اصل روش حل محیط شبیه سازی جی تی سوئیت برای این راهکار قرار گرفت تا با انجام این معادلات، منحنی کاهش دمای موتور در یک بازه زمانی طولانی ۱۶ ساعته در دو حالت عایق بندی شده و پایه (بدون عایق) استخراج و مقایسه شود.

شبیه سازی با فرض دمای اولیه تثبیت شده ۹۴٫۵ درجه سانتی گراد پس از (قرار دادن موتور با بار کامل) آغاز شد. این فرآیند در دو دمای محیطی مجزا تحلیل گردید. ابتدا با دمای محیط ۲۰ درجه سانتی گراد که نتایج تأثیر محصورسازی بر روند تغییرات دمایی در شکل ۹ نمایش داده شده است و بعد با دمای محیط ۵ درجه سانتی گراد که نتایج این شرایط نیز در شکل ۱۰ ارائه گردیده است.

هر دو نمودار به وضوح نشان می دهند که در حالت عایق بندی شده، حرارت بسیار بیشتری نسبت به حالت محصورسازی نشده در موتور حفظ شده است.

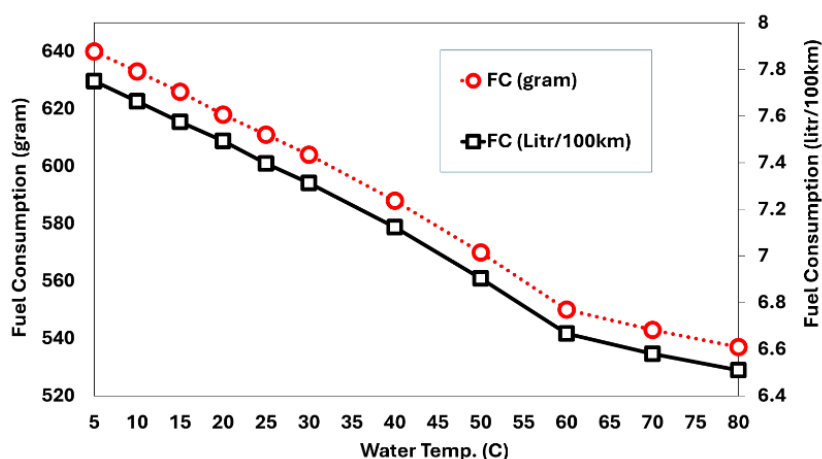


شکل ۹ مقایسه سرد شدن موتور در حالت محصور شده و نشده در دمای محیط ۲۰ درجه سانتی گراد

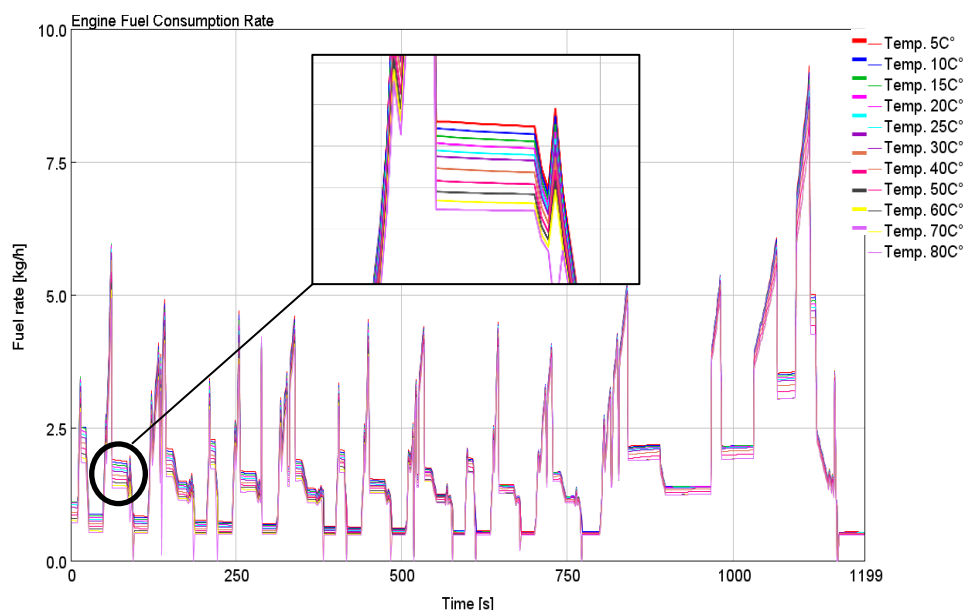


شکل ۱۰ منحنی سرد شدن موتور در دو حالت عایق بندی شده و نشده در دمای محیط ۵ درجه سانتی گراد

(ب) راهکار مصرف سوخت در دماهای مختلف: جهت کمی‌سازی رابطه بین دمای اولیه راه‌اندازی و مصرف سوخت، در مجموع ده حالت دمایی مجزا برای شروع اجرای چرخه تعریف گردید. در این راهکارها، دمای اولیه بدنه موتور و مایع خنک‌کاری در شروع چرخه، از ۵ درجه سانتی‌گراد تا ۸۰ درجه سانتی‌گراد در فواصل ۱۰ درجه ای تعریف شد. اجرای چرخه در دمای اولیه ۲۰ درجه سانتی‌گراد (معادل حالت راه‌اندازی کاملاً سرد) نیز، صحت الگو را مجدداً تأیید کرد، چرا که خروجی مصرف سوخت حالت پایه به داده‌های مودال رسمی شرکت ایپکو بسیار نزدیک بود. در نتیجه راهکارهای مختلف دمایی برای شروع چرخه، اطلاعات مصرف بنزین تجمعی در هر دمای شروعی با شبیه‌سازی این تعداد حالت مختلف به‌دست آمد که نشان دهنده تأثیر دما بر مصرف سوخت حین انجام چرخه است. در نمودار شکل ۱۱ نیز با دو واحد متفاوت مصرف سوخت تجمعی و در نمودار شکل ۱۲ مصرف سوخت لحظه‌ای به این موضوع اشاره دارد و کاملاً مشهود است، هرچه دمای شروع چرخه‌راندگی کمتر باشد مصرف سوخت آن بالاتر است که این موضوع به درستی تأثیر راه‌اندازی سرد و بالا بودن اصطکاک درونی موتور در دمای پایین را نشان می‌دهد.



شکل ۱۱ نمودار مصرف سوخت تجمعی موتور در دماهای متفاوت شروع چرخه



شکل ۱۲ مقایسه مصرف سوخت لحظه‌ای در چرخه اروپا با دماهای مختلف در محیط نرم‌افزار

در نهایت، با توجه به نتایج به دست آمده از این دو راهکار، می توان تحلیل نهایی را انجام داد. به این صورت که با تطبیق مقدار خنک شدن موتور در راهکار (الف) و مصرف سوخت در دماهای مختلف در راهکار (ب)، می توان مشخص کرد که در حالت عایق بندی شده و نشده، پس از گذشت زمان های مختلف خاموشی، اگر موتور دوباره روشن شود، اختلاف دمای راه اندازی آن ها چقدر تفاوت در مصرف سوخت ایجاد کرده و این تفاوت می تواند چه درصدی صرفه جویی در مصرف سوخت لحاظ کند که در بخش بعدی این نتایج به طور کامل نمایش داده خواهد شد.

۲-۵- ملاحظات الگو و محدودیت ها

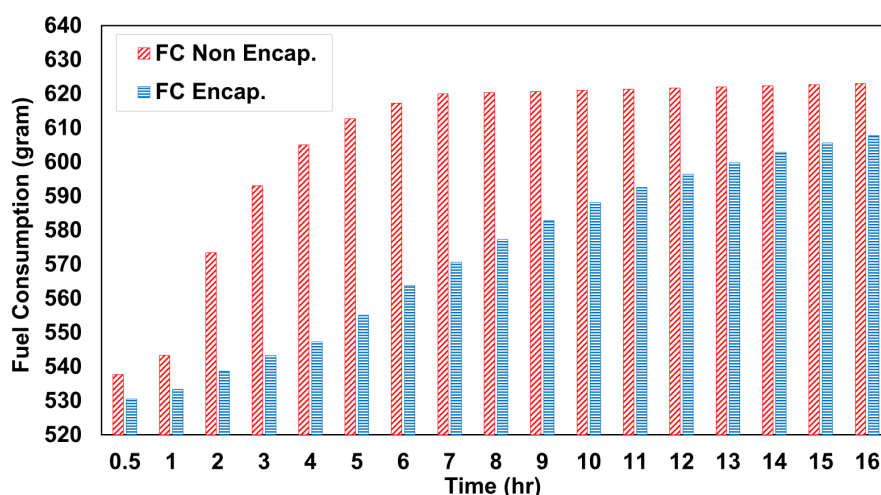
در این پژوهش، تحلیل آلاینده های خروجی بویژه اکسیدهای ازت به صورت مستقیم انجام نشد. دلیل این محدودیت، نیاز به توسعه هم زمان الگوی احتراقی دقیق و داده های تجربی معتبر برای اعتبارسنجی رفتار آلاینده ها بود که خارج از دامنه این مطالعه قرار داشت. هدف اصلی این مقاله، ارزیابی کمی اثر محصورسازی بر مصرف سوخت از طریق تحلیل رفتار حرارتی و اصطکاک داخلی بود.

همچنین دور تلمبه آب در تمامی راهکارها ثابت فرض شد. این فرض با هدف کاهش عدم قطعیت الگوی پایه و امکان تنظیم دقیق تر فرآیند گرم شدن و سرد شدن موتور اتخاذ شد. با وجود آنکه تغییر دبی مایع خنک کننده می تواند بر رفتار حرارتی موتور اثرگذار باشد، بررسی این موضوع نیازمند توسعه الگوی مدیریتی مستقل برای سامانه خنک کاری است که به عنوان مسیر مطالعات آینده پیشنهاد می شود.

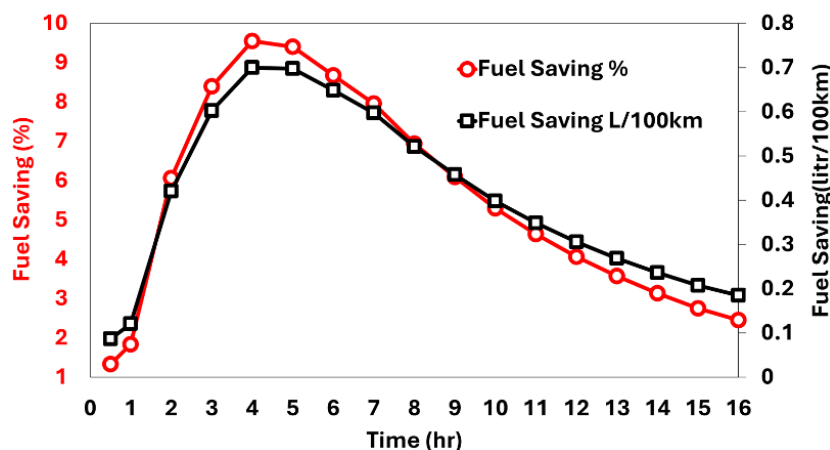
۳- نتایج و بحث

گام نهایی در این تحلیل، متصل کردن نمودار مصرف سوخت راهکار ب با نمودار سرد شدن موتور راهکار الف در دو محیط ۲۰ درجه سانتی گراد و ۵ درجه سانتی گراد است تا نتیجه مطلوب و کمی صرفه جویی در مصرف سوخت، به دست آید. رویکرد به این صورت می پذیرد که در یک بازه زمانی مشخص از سرد شدن موتور (مثلاً ۴ ساعت یا ۸ ساعت پس از خاموشی)، دمای لحظه ای آب بدنه برای هر دو حالت عایق بندی شده و حالت پایه (بدون عایق کاری) از نمودار سرد شدن موتور شکل ۹ استخراج می گردد. سپس با استفاده از نقشه مرجع مصرف سوخت (شکل ۱۱)، مقدار بنزین مصرفی متناظر با این دمای لحظه ای راه اندازی، برای هر دو حالت محاسبه می شود. در آخر اختلاف مصرف سوخت بین حالت عایق بندی شده و نشده، به صورت کمی در طول ۱۶ ساعت استخراج و به صورت درصدی و حجمی (لیتر در ۱۰۰ کیلومتر) گزارش می شود. نمودار ستونی شکل ۱۳ و نمودار مقدار صرفه جویی شکل ۱۴، نتایج متصل شده را در دمای محیط ۲۰ درجه سانتی گراد نشان می دهند.

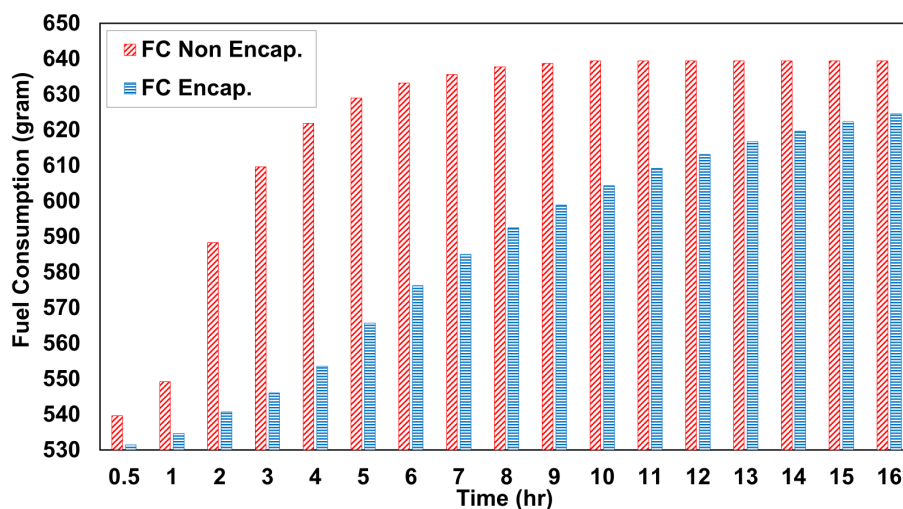
تحلیل این دو شکل به وضوح نشان می دهد که در صورت راه اندازی مجدد موتور پس از ۴ ساعت خاموشی، تفاوت در دمای راه اندازی و به تبع آن، در مصرف سوخت، به نقطه قابل ملاحظه ای می رسد. همچنین موتور عایق بندی شده، مصرف سوخت بهینه تری را در چرخه به نمایش می گذارد که این مقدار بهیچگی تقریباً به ۱۰٪ می رسد. این صرفه جویی بالا از نظر حجمی، به طور تجمعی می تواند مصرف سوخت را تا حدود ۰٫۷ لیتر در ۱۰۰ کیلومتر کاهش دهد. این کاهش مقدار بسیار قابل توجهی است، بویژه با در نظر گرفتن این حقیقت که مصرف پیش فرض موتور ملی نسل دوم در حالت پایه ۲۰ درجه سانتی گراد در عددی حدود ۷٫۵ لیتر در ۱۰۰ کیلومتر بوده است. بیشترین درصد صرفه جویی و بهیچگی مصرف سوخت، دقیقاً در آن بازه زمانی ۳ تا ۵ ساعت رخ می دهد که سامانه محصورسازی، بالاترین اختلاف دمایی را نسبت به حالت پایه حفظ کرده است. حال برای مقایسه و رسیدن به نتایج در شرایط هوای سرد نمودار با دمای محیط ۵ درجه سانتی گراد شکل ۱۰ نیز با شکل ۱۱ متصل می شوند و نمودارهای حاصله در شکل ۱۵ و ۱۶ مشابه شرایط قبلی خلاصه می شوند.



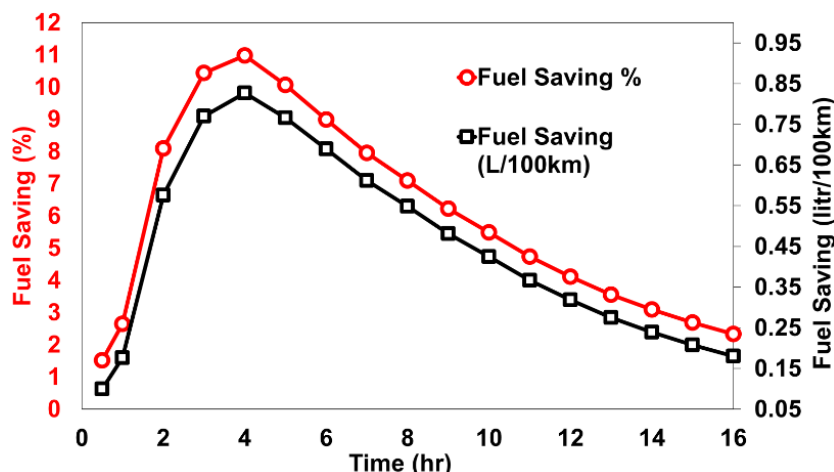
شکل ۱۳ مصرف بنزین در چرخه اروپا بعد از ساعت‌های خاموشی مختلف (عایق‌بندی شده و نشده) در دمای محیط ۲۰ درجه سانتی‌گراد



شکل ۱۴ نمودار مقدار صرفه‌جویی بنزین در چرخه اروپا بعد از مدت ساعت‌های خاموشی مختلف حالت‌های عایق‌بندی شده و نشده با دو واحد مختلف و دمای محیط ۲۰ درجه سانتی‌گراد



شکل ۱۵ مصرف بنزین در چرخه اروپا بعد از ساعت‌های خاموشی مختلف (عایق‌بندی شده و نشده) در دمای محیط ۵ درجه سانتی‌گراد



شکل ۱۶ نمودار مقدار صرفه‌جویی بنزین در چرخه اروپا بعد از مدت ساعت‌های خاموشی مختلف حالت‌های عایق‌بندی شده و نشده با دو واحد مختلف و دمای محیط ۵ درجه سانتی‌گراد

در نمودار ستونی شکل ۱۵ در بازه زمانی کوتاه خاموشی موتور، بویژه در محدوده ۳ تا ۵ ساعت، الگوی محصورسازی اختلاف قابل توجهی در مصرف سوخت نسبت به حالت پایه نشان می‌دهد. با افزایش مدت زمان خاموشی، این اختلاف به تدریج کاهش می‌یابد که به دلیل غلبه تدریجی شرایط محیطی سرد بر سامانه عایق کاری و نزدیک شدن نهایی دمای موتور در هر دو حالت به یکدیگر تفسیر می‌شود. همچنین در نمودار شکل ۱۶ بیشترین مقدار صرفه‌جویی در دوره ۴ ساعته خاموشی و راه‌اندازی مجدد موتور حاصل شده است. این صرفه‌جویی حداکثری به ۱۱٫۵ می‌رسد که معادل تقریباً ۰٫۸۳ لیتر در ۱۰۰ کیلومتر کاهش در مصرف سوخت است.

تحلیل این نتایج نشان می‌دهد که محصورسازی در دمای پایین‌تر ۵ درجه سانتی‌گراد، نسبت به حالت ۲۰ درجه ای آن به مقدار تقریبی ۱٫۵٪ صرفه‌جویی بیشتر و ۰٫۱۳ لیتر در ۱۰۰ کیلومتر کاهش مصرف سوخت بالاتر را تجربه کرده است. لذا، این نتایج مؤید این حقیقت هستند که در هوای سردتر، محصورسازی حرارتی می‌تواند تأثیر افزایشی و قابل توجهی در حفظ انرژی موتور و به تبع آن، افزایش صرفه‌جویی در مصرف سوخت داشته باشد.

۴- نتیجه‌گیری

این پژوهش با هدف ارزیابی کمی سامانه محصورسازی حرارتی بر روی موتور ملی نسل دوم، با استفاده از یک الگوی یک‌بعدی توسعه داده‌شده در نرم‌افزار جی‌تی‌سوئیت و داده‌های شرکت ایپکو انجام شد. نتایج شبیه‌سازی‌ها به‌وضوح اثبات کردند که این فناوری، با حفظ دمای راه‌اندازی مجدد موتور پس از خاموشی، اصطکاک داخلی ناشی از گرانیوی بالای روغن را کاهش داده و دوره ناکارآمدی راه‌اندازی سرد را کوتاه می‌کند.

بیشترین صرفه‌جویی در مصرف سوخت تجمعی چرخه اروپا در بازه خاموشی ۳ تا ۵ ساعته به دست آمد؛ این صرفه‌جویی حداکثر در شرایط محیطی ۲۰ درجه سانتی‌گراد معادل ۱۰٪ (۰٫۷ لیتر در ۱۰۰ کیلومتر) و در شرایط سرد ۵ درجه سانتی‌گراد، به ۱۱٫۵٪ (۰٫۸۳ لیتر در ۱۰۰ کیلومتر) افزایش یافت که نشان می‌دهد، محصورسازی حرارتی یک راهکار مؤثر برای بهینه‌سازی مصرف سوخت در موتورهای داخلی با شرایط آب و هوایی گوناگون ایران است و کارایی آن به‌طور محسوسی در اقلیم‌های سردتر افزایش می‌یابد.

با وجود تأثیر مثبت محصورسازی بر کاهش مصرف سوخت، این فناوری می‌تواند باعث افزایش دمای روغن و تغییر در رفتار آلاینده‌هایی نظیر اکسیدهای ازت شود. نظر به محدودیت داده‌های تجربی معتبر برای رفتار گذرای روغن، تمرکز این پژوهش صرفاً بر تحلیل دمای سیال خنک‌کننده (با فرض دور ثابت تلمبه آب برای تنظیم دقیق) قرار گرفت. لذا پیشنهاد

می‌گردد در مطالعات آتی، تقابل حرارتی میان کاهش مصرف سوخت و مقدار آلاینده‌های خروجی با توسعه الگوهای جامع‌تر احتراقی ارزیابی شود. همچنین با توجه به قابلیت‌های روش توسعه‌یافته، پیشنهاد می‌شود در کارهای آینده، تحلیل حساسیت جامعی بر روی تأثیر متغیرهای طراحی عایق (از جمله ضخامت، هندسه و جنس مواد) بر مقدار حفظ حرارت سامانه انجام پذیرد.

تشکر و قدردانی

نویسندگان این مقاله، مراتب تشکر و قدردانی خود را از شرکت تحقیق، طراحی و تولید موتور ایران خودرو (ایپکو)، به دلیل حمایت‌های فنی و ارائه داده‌های مورد نیاز برای تکمیل این پژوهش، اعلام می‌دارند.

References

- [1] Faria MV, Varella RA, Duarte GO, Farias TL, Baptista PC. Engine cold start analysis using naturalistic driving data: City level impacts on local pollutants emissions and energy consumption. *Science of The Total Environment*. 2018 Jul 15;630:544-59. doi: [10.1016/j.scitotenv.2018.02.232](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.02.232)
- [2] Mohammadi A, Montazer Y, Rahimi Asiabaraki H. Reduction of fuel consumption and emissions of Iranian naturally aspirated engine on Samand vehicle with thermal management. *The Journal of Engine Research*. 2025 Feb 19;71(4):58-76. doi: [10.22034/er.2025.2053701.1077](https://doi.org/10.22034/er.2025.2053701.1077)
- [3] Yuan R, Price C, Kasurkar R, Spenley M, Dutta N, Ebrahimi K. Numerical investigation of heat retention and warm-up with thermal encapsulation of powertrain. In *WCX SAE World Congress Experience* 237384 2020 Apr 14. doi: [10.4271/2020-01-0158](https://doi.org/10.4271/2020-01-0158)
- [4] Minovski B, Andrić J, Löfdahl L, Gullberg P. A numerical investigation of thermal engine encapsulation concept for a passenger vehicle and its effect on fuel consumption. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*. 2019 Feb;233(3):557-71. doi: [10.1177/0954407017749074](https://doi.org/10.1177/0954407017749074)
- [5] Duvigneau F, Luft T, Hots J, Verhey JL, Rottengruber H, Gabbert U. Thermo-acoustic performance of full engine encapsulations—A numerical, experimental and psychoacoustic study. *Applied Acoustics*. 2016 Jan 15;102:79-87. doi: [10.1016/j.apacoust.2015.09.012](https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2015.09.012)
- [6] Tan L, Yuan Y, Huang C, Yu Q. Numerical simulation of muffler cover temperature analysis for general purpose engine based on CFD. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*. 2024 Dec 31;46(1):17034-52. doi: [10.1080/15567036.2020.1819477](https://doi.org/10.1080/15567036.2020.1819477)
- [7] Caputo F, Lamanna G, De Luca A, Armentani E. Thermo-Mechanical Investigation on an Automotive Engine Encapsulation System Made of Fiberglass Reinforced Polyamide PA6 GF30 Material. In *Macromolecular Symposia* 2020 Feb (Vol. 389, No. 1, p. 1900100). doi: [10.1002/masy.201900100](https://doi.org/10.1002/masy.201900100)
- [8] Owen R, Price A, Barril Boleto JD, Sivasankaran S, Jansen W. Method development and application of thermal encapsulation to reduce fuel consumption of internal combustion powertrains. In *WCX SAE World Congress Experience* 237383 2019 Apr 2. doi: [10.4271/2019-01-0902](https://doi.org/10.4271/2019-01-0902)
- [9] Yuan R, Dutta N, Sivasankaran S, Jansen W, Ebrahimi K. Heat retention analysis with thermal encapsulation of powertrain under natural soak environment. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2020 Feb 1;147:118940. doi: [10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.118940](https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.118940)
- [10] D'Amico R, Stelzer R, Bihhadi A, Courtois T. Engine encapsulation: impact on vehicle NVH and CAE challenges. In *International Conference on Noise and Vibration Engineering (ISMA2016)*, Leuven 2016.
- [11] Batooei A. Performance and fuel consumption simulation for optimized manual transmission gear ratio selection. *The Journal of Engine Research*. 2025 May 22;72(1):45-58. doi: [10.22034/er.2025.2058229.1091](https://doi.org/10.22034/er.2025.2058229.1091)
- [12] Heywood JB. *Internal combustion engine fundamentals*. 2nd ed. New York: McGraw-Hill; 2018.
- [13] Bergman TL, Lavine AS, Incropera FP, DeWitt DP. *Introduction to heat transfer*. John Wiley & Sons; 2011 Jun 13.