



The effect of changing fuel from gasoline to compressed natural gas on the high cycle fatigue life of M13 engine piston

Hojjat Ashouri*

Department of Mechanic, Varamin-Pishva Branch (VaP.C.), Islamic Azad University, Varamin, Iran

ARTICLE INFO

Keywords:

Compressed Natural Gas
Gasoline
Piston
High Cycle Fatigue Life

ABSTRACT

Engine pistons are subjected to severe thermo-mechanical loading. The resulting high-cycle fatigue (HCF) is the dominant damage mechanism and governs service life; hence, reliable fatigue-life prediction is essential. This study quantifies the influence of switching the fuel from gasoline to compressed natural gas (CNG) on the HCF life of a gasoline-engine piston. A sequentially coupled thermo-mechanical finite-element model was built in ANSYS; temperatures and stresses were exported to nCode Design-Life and the Goodman mean-stress correction was applied to estimate HCF life. Because CNG burns more slowly than gasoline, the combustion event is longer, so the piston crown is exposed to higher temperatures and stresses under CNG operation. The simulation shows that the peak temperature rises by 24 °C and the maximum stress by 5.04 MPa when CNG is used. Consequently, the predicted HCF life drops by 1.44×10^8 cycles ($\approx 29\%$). The numerically identified critical location coincides with the crack initiation site observed in a failed piston, validating the model.



© 2025 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: ha.ashouri@iau.ac.ir (H. Ashouri)

Received 15 August 2025; Accepted 18 September 2025

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

Cite this article: Ashouri H. The effect of changing fuel from gasoline to compressed natural gas on the high cycle fatigue life of M13 engine piston. 2025 Nov 22;72(3):106-123. doi: [10.22034/ER.2025.2068748.1100](https://doi.org/10.22034/ER.2025.2068748.1100)

اثر تغییر سوخت از بنزین به گاز طبیعی فشرده بر عمر خستگی پرچرخه سمبه موتور M13

حجت عاشوری*

گروه مکانیک، واحد ورامین-پیشوا، دانشگاه آزاد اسلامی، ورامین، ایران

چکیده	اطلاعات مقاله
<p>سمبه یک موتور تحت بارگذاری شدید حرارتی و مکانیکی قرار دارد. خستگی ناشی از بارگذاری هم‌زمان حرارتی و مکانیکی، نقش تعیین کننده‌ای در ایجاد آسیب و کاهش عمر سمبه دارد. بنابراین شبیه‌سازی و تحلیل عمر خستگی آن ضروری است. هدف این پژوهش ارزیابی عمر خستگی پرچرخه سمبه با تغییر سوخت آن از بنزین به گاز طبیعی فشرده است. در این پژوهش، تحلیل عمر خستگی پرچرخه سمبه با استفاده از روش اجزای محدود و نرم‌افزار انسیس به منظور پیش‌بینی دما و تنش و سپس عمر خستگی پرچرخه با استفاده از تئوری گودمن و نرم‌افزار ANSYS nCode Design Life انجام شده است. با توجه به پایینتر بودن سرعت احتراق سوخت گاز طبیعی نسبت به بنزین، طول دوره احتراق در حالت سوخت گاز طبیعی طولانی‌تر می‌شود. بنابراین سمبه در وضعیت گاز نسبت به بنزین دما و تنش بیشتری را تحمل خواهد کرد. در نتیجه عمر خستگی سمبه در وضعیت گاز نسبت به بنزین بصورت قابل ملاحظه‌ای کاهش خواهد یافت. نتایج عددی نشان داد که حداکثر دما در مرکز تاج سمبه رخ می‌دهد. براساس نتایج تحلیل ترمومکانیکی، سمبه در وضعیت گاز نسبت به وضعیت بنزین در حدود ۲۴ درجه سانتیگراد و ۵,۰۳۶ مگاپاسکال تنش بیشتری را تحمل می‌کند. نتایج تحلیل خستگی نشان داد که جایگزینی گاز به جای بنزین باعث کاهش عمر خستگی پرچرخه سمبه در حدود ۱,۴۳۸×۱۰۸ چرخه یا حدود ۲۹ درصد خواهد شد. برای بررسی صحت نتایج تحلیل ترمومکانیکی و عمر خستگی پرچرخه، نتایج شبیه‌سازی شده با نمونه واقعی سمبه آسیب دیده مقایسه گردید و نشان داده شد که نواحی بحرانی، مطابقت مناسبی با نواحی گسیختگی در نمونه واقعی دارد.</p>	<p>کلیدواژه‌ها: گاز طبیعی فشرده بنزین سمبه عمر خستگی پرچرخه</p>



© 2025 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: ha.ashouri@iau.ac.ir (حجت عاشوری)

دریافت ۲۴ مرداد ۱۴۰۴؛ پذیرش ۲۷ شهریور ۱۴۰۴
شاپای الکترونیکی: ۴۱۲۱-۲۳۴۵ / شاپای چاپی: ۵۲۱۴-۱۷۳۵

Cite this article: Ashouri H. The effect of changing fuel from gasoline to compressed natural gas on the high cycle fatigue life of M13 engine piston. 2025 Nov 22;72(3):106-123. doi: 10.22034/ER.2025.2068748.1100

۱- مقدمه

سمبه یکی از قطعات مهم و پیچیده موتور است که تنش‌های ترمومکانیکی ناشی از فشار احتراق و حرارت گاز را تحمل می‌نماید. وظیفه سمبه انتقال فشار ناشی از احتراق موتور به دسته سمبه و در نهایت به میل‌لنگ و تولید قدرت است. باتوجه به اینکه سمبه در معرض تغییرات شدید دما و فشار احتراق قرار دارد، قطعه‌ای بسیار بحرانی است و لازم است عمر خستگی آن پیش‌بینی شود [۱-۳].

امروزه، تحقیقات فراوانی در زمینه هندسه سمبه، استحکام، مواد و ارزیابی عمر خستگی آن انجام می‌شود اما در عین حال سمبه‌های زیادی در حین کارکرد موتور آسیب می‌بینند. مهمترین دلایل آسیب در سمبه، خوردگی، گرادبان دما، خستگی و سایش آن است [۲، ۴].

در خودروهای دوگانه سوز، سوخت‌های گازی به دلیل قیمت پایین، عدد اکتان بالا و آلودگی پایین به عنوان اصلی ترین سوخت جایگزین به شمار می‌روند که امروزه گاز طبیعی در زمره مهمترین آن‌ها در جهان است. به دلیل ذخایر بالای جهانی گاز طبیعی نسبت به سایر سوخت‌های فسیلی، تحقیقات بر روی استفاده بهینه گاز طبیعی در موتورهای احتراق داخلی رو به فزونی نهاده است. از طرف دیگر مدت زمان احتراق گاز از بنزین بیشتر است و در نتیجه زمان ماندگاری گرما در داخل محفظه احتراق موتور افزایش می‌یابد [۵، ۶]. بنابراین سمبه دمای بیشتری را تحمل می‌کند که نشان دهنده اهمیت بیشتر تحلیل ترمومکانیکی و خستگی سمبه در موتوهای دوگانه‌سوز است.

در زمینه تحلیل تنش و عمر خستگی سمبه تاکنون پژوهش‌های مختلفی انجام شده است. تحلیل تنش و پیش‌بینی عمر خستگی پرچرخه سمبه در یک موتور ارتقا یافته به وسیله نجفی و همکاران مورد ارزیابی قرار گرفت. شبیه‌سازی آن‌ها نشان داد عمر خستگی پرچرخه سمبه موتور ارتقا یافته بصورت چشمگیری کمتر از سمبه موتور اولیه است [۷].

لیو و همکاران بهینه‌سازی تنش حرارتی سمبه پوشش داده شده را مورد پژوهش قرار دادند. بررسی آن‌ها نشان داد که تنش حرارتی در سمبه پوشش داده شده در مقایسه با سمبه پوشش داده نشده در حدود ۲۳۵٪ درصد کاهش می‌یابد [۸]. پیش‌بینی عمر خستگی سمبه یک موتور تک‌استوانه توسط یان و همکاران مورد مطالعه قرار گرفت. براساس تحقیقات آن‌ها عمر خستگی سمبه با افزایش دمای آن کاهش خواهد یافت [۹].

عاشوری تحلیل ترمومکانیکی و عمر خستگی سمبه را بادر نظر گرفتن گرادبان تنش مورد پژوهش قرار داد. نتایج تحلیل حرارتی نشان داد که بیشینه تنش وان مایسس و حداقل عمر خستگی پرچرخه در ناحیه بالایی محور سمبه رخ می‌دهد [۱۰].

اثر مسیر روغن بر توزیع تنش و عمر خستگی پرچرخه سمبه یک موتور اشتعال جرقه‌ای به وسیله عاشوری مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج شبیه‌سازی او نشان داد که مسیر روغن باعث کاهش تنش سمبه و در نتیجه افزایش عمر خستگی پرچرخه آن می‌شود [۱۱].

یونگ و همکاران عمر خستگی حرارتی سمبه را پیش‌بینی کردند. مطالعات آن‌ها نشان داد که اختلاف بین عمر خستگی تجربی و شبیه‌سازی شده کمتر از ۱۰ درصد است [۱۲]. بررسی گسیختگی ناشی از سایش و بهینه‌سازی بین سمبه مجهز به استوانک مسی به منظور کاهش فشار تماس در بین سمبه توسط ونگ و همکاران انجام شد. پژوهش آن‌ها نشان داد که فشار تماس در سمبه اصلاح شده در حدود ۲۰،۳ درصد کاهش می‌یابد [۱۳].

عاشوری اثر تنش پسماند پوشش حائل حرارتی بر تنش و عمر خستگی سمبه پوشش داده شده را مورد مطالعه قرار داد. نتایج تحلیل عمر خستگی پرچرخه نشان داد که در نظر نگرفتن اثر تنش پسماند باعث می‌شود که تعداد چرخه‌های گسیختگی حدود ۶،۴ درصد بیشتر از مقدار مجاز تخمین زده شود [۱۴].

اثر مسیر روغن بر توزیع دما و تنش‌های ترمومکانیکی سمبه به وسیله عاشوری و افشاری ارزیابی شد. نتایج نتایج تحلیل مکانیکی نشان داد که تنش وان مایسس در سمبه اصلاح شده در حدود ۱۳ مگاپاسکال کاهش می‌یابد [۱۵].

لیو و همکاران تحلیل ترمومکانیکی و بهینه‌سازی سمبه فولادی را بررسی کردند. براساس تحقیقات آن‌ها تنش حرارتی در سمبه اصلاح شده در حدود ۳,۹۳ درصد کاهش می‌یابد [۱۶]. عمر خستگی ترمومکانیکی سمبه موتور دیزل مجهز به مسیر روغن به وسیله ونگ و همکاران با استفاده از الگوی سیتقلو پیش‌بینی گردید. شبیه‌سازی آن‌ها نشان داد که حداقل عمر خستگی ترمومکانیکی سمبه ۴۴۲۰ چرخه است [۱۷].

لیو و همکاران تحلیل ترمومکانیکی و بهینه‌سازی سمبه فولادی موتور دیزل را بررسی کردند. بهینه‌سازی سمبه باعث افزایش ضریب اطمینان خستگی پرچرخه سمبه در حدود ۵۴ درصد گردید [۱۸]. تحلیل عمر خستگی سمبه با استفاده از الگوی ترمومکانیکی به وسیله چن و همکاران ارزیابی شد. بررسی آن‌ها نشان داد که حداقل ضریب اطمینان خستگی ۱,۸۳ است که در ناحیه پین سمبه رخ می‌دهد [۲].

ونکاتاچالام و کوراماول علت گسیختگی سمبه موتور دیزل را بصورت تجربی بررسی کردند. تحقیقات آن‌ها نشان داد که افزایش درصد سیلیس باعث افزایش عمر خستگی سمبه می‌شود [۴]. طراحی و تحلیل ترمومکانیکی سمبه آلومینیمی و مواد مرکب با استفاده نرم‌افزار انسیس به وسیله داگار و همکاران انجام شد. بررسی آن‌ها نشان داد که ضریب اطمینان خستگی سمبه مواد مرکب از سمبه آلومینیمی بیشتر است [۳].

تان و همکاران اثر پوشش حائل حرارتی را بر عمر خستگی سمبه بررسی کردند. تحقیقات آن‌ها نشان داد که عمر خستگی سمبه پوشش داده شده با روش پاشش پلاسما در مقایسه با سایر روش‌های پوشش‌دهی سمبه کمتر است [۱۹]. شبیه‌سازی و بررسی تجربی خستگی سمبه فولادی آهنگری شده به وسیله گای و ژائو تحلیل شد. حداقل ضریب اطمینان خستگی پرچرخه در مسیر روغن مشاهده گردید [۲۰].

موسوسامی و همکاران اثر پوشش سپر حرارتی را بر عملکرد، توزیع دما و تنش در سمبه مطالعه کردند. نتایج تحقیقات آن‌ها نشان داد که پوشش حائل حرارتی علاوه بر کاهش آلایندگی موتور باعث کاهش توزیع دما و تنش در سمبه نیز می‌شود [۲۱]. اثر شکل هندسی مسیر روغن بر دما و جریان روغن توسط آپایدین و دونر مورد پژوهش قرار گرفت. تحقیقات آن‌ها نشان داد که قطر بهینه مسیر روغن ۷,۵ میلی‌متر است [۲۲].

علی و همکاران طراحی و تحلیل ترمومکانیکی سمبه را تحت شرایط آزمون خستگی با استفاده از نانولوله‌های کربنی را انجام دادند. تحلیل‌های آن‌ها نشان داد که نانولوله‌های کربنی در مقایسه با سایر مواد تنش کمتری را تحمل می‌کنند [۲۳]. تحلیل گسیختگی سمبه یک موتور دیزل دارای مسیر روغن بوسیله کالدرا و همکاران بررسی شد. آزمایش‌های آن‌ها نشان داد که علت گسیختگی سمبه، تنش‌های ترمومکانیکی اعمالی بر آن است [۲۴]. بهینه‌سازی موقعیت مسیر روغن در یک موتور دیزل به وسیله دنگ و همکاران بررسی شد. در این موتور فاصله مطلوب بین تاج سمبه و مسیر روغن ۱۲,۵ میلی‌متر تعیین شد [۲۵].

بالاجی و همکاران تحلیل خستگی سمبه را با در نظر گرفتن نیروی جانبی سمبه را انجام دادند. شبیه‌سازی آن‌ها نشان داد که آسیب خستگی در سمبه در محدوده مجاز است [۱]. پیش‌بینی عمر خستگی سمبه‌های فولادی آهنگری شده با تغییر همبسته آن به وسیله نیو و همکاران ارزیابی شد. بررسی آن‌ها نشان داد که ضریب اطمینان خستگی سمبه با تغییر همبسته آن در بازه مجاز قرار دارد [۲۶].

سونی و همکاران شبیه‌سازی و تحلیل ترمومکانیکی سمبه را با استفاده از نرم‌افزار انسیس انجام دادند. شبیه‌سازی آن‌ها نشان داد که تنش ترمومکانیکی اعمالی بر سمبه از تنش تسلیم آن کمتر است [۲۷]. تحلیل ترمومکانیکی و پیش‌بینی عمر خستگی پرچرخه سمبه با در نظر گرفتن اثر کوبش موتور به وسیله ونگ و همکاران بررسی شد. حداقل عمر خستگی پرچرخه سمبه در ناحیه بحرانی پین سمبه ۱۴,۴ میلیون چرخه پیش‌بینی گردید [۲۸]. یائو و کیان اثر گاز طبیعی را بر دمای سمبه پوشش داده شده یک موتور گازسوز بررسی کردند. نتایج تحلیل حرارتی نشان داد که سمبه پوشش داده شده در مقایسه با سمبه بدون پوشش دمای کمتری را تحمل می‌کند [۲۹].

اثر سوخت گاز طبیعی بر دمای سمبه موتور M13 به وسیله عاشوری و همکاران بررسی شد. براساس نتایج تحلیل حرارتی، استفاده از گاز به جای بنزین باعث افزایش دمای سمبه در حدود ۱۲ درصد خواهد شد [۳۰].

براساس مطالبی که در قسمت مقدمه ذکر شد، اثر گاز بر تنش و عمر خستگی سمبه در موتورهای دوگانه سوز مورد پژوهش قرار نگرفته است. سمبه حرارت بالای ناشی از احتراق موتور را تحمل می‌کند که شار و درجه حرارت به طور متناوب تغییر کرده و می‌تواند موجب ترک و در نتیجه گسیختگی در سمبه موتور می‌شود. بنابراین تحلیل ترمومکانیکی و پیش‌بینی عمر خستگی سمبه لازم و ضروری است. از طرف دیگر با توجه به کُندتر بودن سرعت احتراق سوخت گاز طبیعی نسبت به بنزین، طول دوره احتراق در حالت سوخت گاز طبیعی طولانی‌تر می‌شود.

بنابراین عمق نفوذ گرما به داخل سمبه و سایر اجزای محفظه احتراق افزایش می‌یابد که نشان دهنده اهمیت بیشتر تحلیل حرارتی، ترمومکانیکی و خستگی اجزای محفظه احتراق و بویژه سمبه در موتورهای دوگانه‌سوز است [۵، ۶].

افزایش مدت زمان احتراق گاز طبیعی نسبت به بنزین باعث افزایش زمان ماندگاری گرما در داخل محفظه احتراق موتور می‌شود. بنابراین سمبه در وضعیت گاز نسبت به بنزین دمای بیشتری را تحمل می‌کند که این نکته باعث افزایش تنش ترمومکانیکی اعمالی بر سمبه در وضعیت گاز نسبت به بنزین خواهد شد.

در نتیجه عمر خستگی سمبه بعلاوه تحمل تنش ترمومکانیکی بیشتر در وضعیت گاز نسبت به بنزین کاهش خواهد یافت. بنابراین هدف این پژوهش ارزیابی اثر بررسی اثر سوخت گاز طبیعی بر عمر خستگی پرچرخه موتور دوگانه سوز M13 است. برای این منظور ابتدا از نرم‌افزار سالیدورکس برای شبیه‌سازی سمبه استفاده گردید. شرایط مرزی سمبه در تحلیل حرارتی و مکانیکی از شبیه‌سازی یک بعدی موتور در نرم‌افزارهای جی‌تی‌پاور و متلب استخراج گردید. سپس از نرم‌افزار انسیس برای تحلیل تنش‌های ترمومکانیکی سمبه در دو وضعیت بنزین و گاز استفاده شد و در نهایت از نرم‌افزار انسیس آن‌کد دیزاین برای پیش‌بینی عمر خستگی پرچرخه سمبه و بررسی اثر تغییر سوخت از بنزین به سوخت گاز طبیعی استفاده گردید.

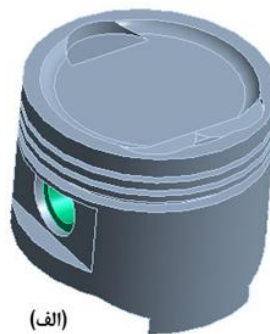
۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- شبیه‌سازی اجزای محدود

امروزه برای کاهش هزینه و زمان تولید محصول از روش‌های شبیه‌سازی به جای آزمون‌های اعتبارسنجی استفاده می‌شود. سمبه یکی از قطعات پیچیده و چالش برانگیز موتور است که تحلیل اجزای محدود نقش مهمی در بهینه‌سازی آن دارد [۷، ۱۰، ۲۷]. سمبه مورد بررسی در این پژوهش در شکل ۱ نشان داده شده است. به منظور اینکه تحلیل ترمومکانیکی و پیش‌بینی عمر خستگی پرچرخه سمبه به واقعیت نزدیکتر باشد، علاوه بر سمبه، پین سمبه نیز شبیه‌سازی شده است. مشخصات موتور در جدول ۱ آورده شده است. طرح اجزاء محدود از ۶۸۷۰۱ جزء برای افزایش دقت نتایج تحلیل اجزای محدود تشکیل شده است. برای شبکه‌بندی سمبه از اجزاء سه‌بعدی Tet10 استفاده شده است.



(ب)



(الف)

شکل ۱ الف) سمبه و پین سمبه و ب) مدل اجزای محدود سمبه و پین سمبه

جدول ۱ مشخصات موتور M13

مقدار مشخصه (واحد)	نام مشخصه
۷۱ (میلی متر)	قطر استوانه
۸۳٫۶ (میلی متر)	پیمایش سمبه
۹٫۷ (-)	نسبت تراکم
۱۳۲۳ (سی سی)	حجم موتور
۱۰۳ (نیوتن-متر در ۲۸۰۰ دور بر دقیقه)	حداکثر گشتاور
۶۳ (اسب بخار در ۵۵۰۰ دور بر دقیقه)	حداکثر قدرت

۲-۲- شرایط مرزی در تحلیل ترمومکانیکی

معادله انتقال حرارت برحسب زمان در مختصات قطبی بدین شکل است [۲۹، ۳۰]:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(kr \frac{\partial}{\partial r} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(kr \frac{\partial}{\partial \theta} \right) + \frac{\partial}{\partial r} \left(k \frac{\partial}{\partial r} \right) = \frac{1}{\alpha} \left(\frac{\partial T}{\partial t} \right) \quad (1)$$

که دمای T بصورت تابعی از مختصات r و θ است. در شرایط تحلیل حرارتی پایدار سمبه، سازوکار انتقال حرارت، جابه‌جایی است. در این پژوهش دمای سیال T_f و ضریب جابه‌جایی h به منظور در نظر گرفتن شرایط مرزی در تحلیل حرارتی سمبه لحاظ شده است. این شرایط مرزی با معادله ۲ توصیف می‌شود [۲۹، ۳۰]:

$$-k \frac{\partial T}{\partial n} = h(T - T_f) \quad (2)$$

شرایط مرزی صحیح باعث افزایش دقت نتایج تحلیل اجزای محدود خواهد شد. شرایط مرزی در تحلیل حرارتی سمبه شامل چهار ناحیه است [۲۷، ۲۹-۳۱]:

۱- شرط مرزی ناحیه احتراق

۲- شرط مرزی پیرامون سمبه و شیار حلقه‌ها

۳- شرط مرزی نواحی درونی سمبه

۴- شرط مرزی ناحیه بین سمبه

برای محاسبه شرط مرزی احتراق ابتدا باید دما و ضریب انتقال حرارت جابجایی داخل استوانه را برای یک چرخه کامل موتور محاسبه کرد. برای محاسبه ضریب انتقال حرارت جابجایی از معادله ووشنی استفاده می‌شود [۵]:

$$h_g = 3.26 P^{0.8} U^{0.8} b^{-0.2} T_g^{-0.55} \quad (3)$$

برای محاسبه مقادیر متوسط ضریب انتقال حرارت و دما از معادلات ۴ و ۵ استفاده می‌شود [۵]:

$$\bar{T}_g = \frac{1}{4\pi h_g} \int_0^{4\pi} T_g h_g d\theta \quad (4)$$

$$\bar{h}_g = \frac{1}{4\pi} \int_0^{4\pi} h_g d\theta \quad (5)$$

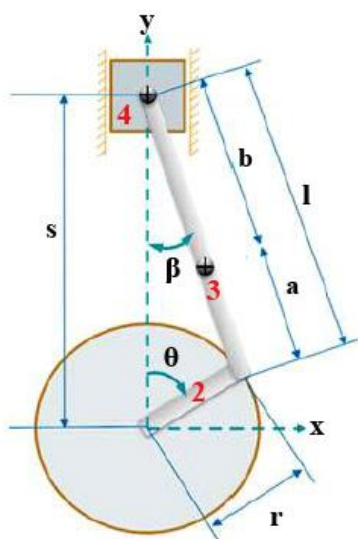
شرط مرزی ناحیه احتراق با استفاده از شبیه‌سازی موتور در نرم‌افزار جی‌تی‌پاور محاسبه شده است و بر تاج سمبه اعمال شده است.

برای سایر قسمت‌های مختلف سمبه از ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی و دما استفاده می‌شود که در جدول ۲ نشان داده شده است.

در تحلیل نیروهای اعمالی بر سمبه از سازوکار لنگ و لغزنده مطابق شکل ۲ استفاده شده است. در شکل عضوهای ۲، ۳ و ۴ بترتیب نشانگر میل‌لنگ، دسته سمبه و سمبه است.

جدول ۲ شرایط مرزی در تحلیل حرارتی [۳۱، ۳۲]

شرط مرزی	ناحیه
230 W/m ² C, 300°C	بالای حلقه‌ها
625 W/m ² C, 85°C	شیار حلقه‌ها
115 W/m ² C, 110°C	نشیمگاه حلقه‌ها
60 W/m ² C, 85°C	دامن سمبه
191 W/m ² C, 85°C	داخل سمبه
60 W/m ² C, 85°C	بین سمبه



شکل ۲ سازوکار لنگ و لغزنده

باتوجه به شکل ۲ داریم [۳۳]:

$$s = r \cos \theta + l \cos \beta \quad (۶)$$

$$l \sin \beta = r \sin \theta \quad (۷)$$

با مشتق‌گیری از معادله ۷ سرعت زاویه‌ای و شتاب زاویه‌ای دسته سمبه بدست می‌آید [۳۳]:

$$\dot{\beta} = \frac{r}{l} \dot{\theta} \frac{\cos \theta}{\cos \beta} \quad (۸)$$

$$\ddot{\beta} = \frac{-r \dot{\theta}^2 \sin \theta + r \dot{\beta}^2 \sin \beta}{l \cos \beta} \quad (۹)$$

شتاب سمبه با مشتق دوم معادله ۶ بیان می‌شود [۳۳]:

$$a_p = \ddot{s} = -r \dot{\theta}^2 \cos \theta - l \dot{\beta}^2 \cos \beta - l \ddot{\beta} \sin \beta \quad (۱۰)$$

باتوجه به نمودار آزاد سمبه که در شکل ۳-الف نشان داده شده است، معادلات تعادل سمبه بدین شرح‌اند [۳۳]:

$$F_{34x} = F_{14} \quad (۱۱)$$

$$F_{34y} = F_{gas} + m_p a_p \quad (۱۲)$$

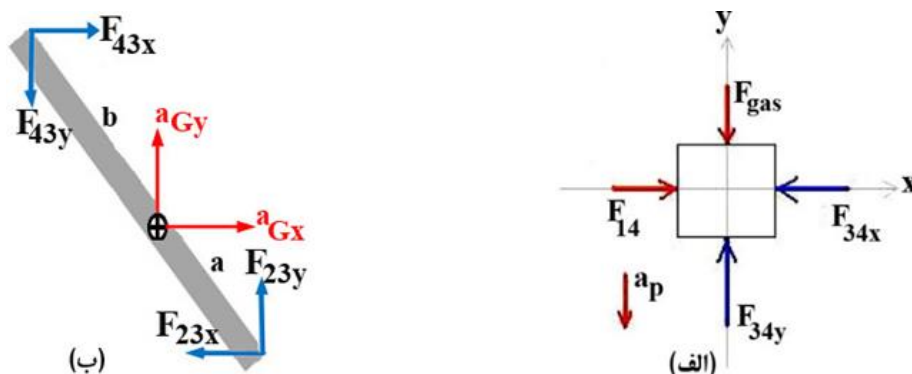
نیروی جانبی سمبه F_{34x} باتوجه به نمودار آزاد دسته سمبه که در شکل ۳-ب نشان داده شده است، محاسبه می‌شود.

معادلات تعادل دسته سمبه بدین صورت‌اند [۳۳]:

$$F_{43x} = F_{23x} + m_c a_{Gx} \quad (13)$$

$$F_{23y} = F_{43y} + m_c a_{Gy} \quad (14)$$

$$F_{23x} a \cos \beta + F_{43x} b \cos \beta - F_{43y} b \sin \beta - F_{23x} a \cos \beta - IG \ddot{\beta} = 0 \quad (15)$$



شکل ۳ نمودار آزاد الف) سمبه و ب) دسته سمبه

با استفاده از برنامه‌ای که در نرم‌افزار متلب نوشته شده است، نیروهای اعمالی بر سمبه محاسبه گردید و بر سمبه اعمال گردید. تحلیل مکانیکی سمبه با مقید کردن محور سمبه و استفاده از سطح تماس اصطکاکی بین محور سمبه و سمبه انجام شده است.

۲-۳- مدل تحلیل خستگی پرچرخه

قطعات مختلف موتور در معرض بارهای تکراری قرار دارند و تنش‌های متناوب حاصله می‌توانند منجر به آسیب خستگی در آن‌ها شوند. بروز شکست خستگی در قطعات مختلف موتور خطرناک و پرهزینه است و طراحی خستگی مناسب می‌تواند این خسارت بسیار زیاد را بصورت چشمگیری کاهش دهد. بنابراین لازم است عمر خستگی قطعات مختلف موتور پیش‌بینی شود. در قطعاتی که در معرض بارهای ترمومکانیکی قرار دارند، در صورتی که تنش به ناحیه پلاستیک برسد، خستگی آن‌ها از نوع کم‌چرخه و در صورتی که تنش در ناحیه الاستیک باقی بماند، از نوع پرچرخه خواهد بود [۳۴]. در ارزیابی عمر خستگی پرچرخه سمبه از جنس همبسته آلومینیم از معیار گودمن که از معیارهای خستگی پرچرخه است، استفاده می‌شود [۷، ۱۰، ۱۱]. بنابراین در این تحقیق نیز از این معیار استفاده شده است. این معیار بدین صورت بیان می‌شود [۳۴].

$$\frac{\sigma_a}{\sigma_e} + \frac{\sigma_{mean}}{\sigma_{ult}} = \frac{1}{n} \quad (16)$$

در این پژوهش یک چرخه کامل موتور بصورت افزایش دمای سمبه از دمای محیط تا دمای بیشینه کاری موتور و سپس کاهش دمای سمبه تا دمای محیط مورد تحلیل حرارتی قرار گرفته است. سپس تحلیل مکانیکی در دو مرحله با استفاده از نتایج تحلیل حرارتی و نیروهای اعمالی بر سمبه انجام شده و در گام آخر تاریخچه تنش به منظور محاسبه دامنه تنش و تنش میانگین و در نهایت محاسبه عمر خستگی بر اساس معیار گودمن وارد نرم‌افزار انسیس ان کد دیزاین شده است.

۲-۴- روند ارزیابی تغییر سوخت از بنزین به گاز بر عمر خستگی پرچرخه سمبه

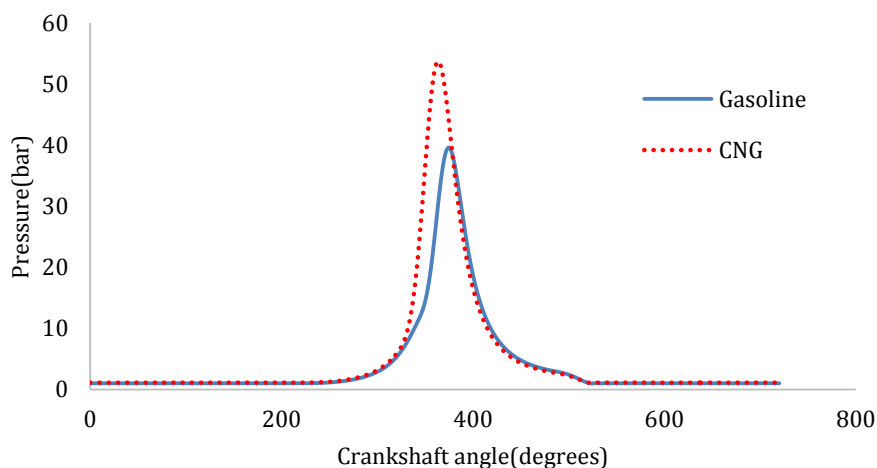
روند ارزیابی تغییر سوخت از بنزین به گاز بر عمر خستگی پرچرخه سمبه بصورت زیر است:

- ۱- شبیه‌سازی سمبه در نرم‌افزار سالی‌دورکس
- ۲- شبکه‌بندی سمبه در نرم‌افزار انسیس
- ۳- محاسبه شرایط مرزی حرارتی و مکانیکی با استفاده از نرم‌افزارهای جی‌تی‌پاور و متلب
- ۴- تحلیل حرارتی و مکانیکی سمبه با استفاده از نرم‌افزار انسیس
- ۵- ارزیابی تغییر سوخت از بنزین به گاز بر عمر خستگی پرچرخه سمبه با استفاده از نرم‌افزار انسیس ان‌کد دیزاین

۳- نتایج و بحث

۳-۱- شرایط مرزی ترمومکانیکی

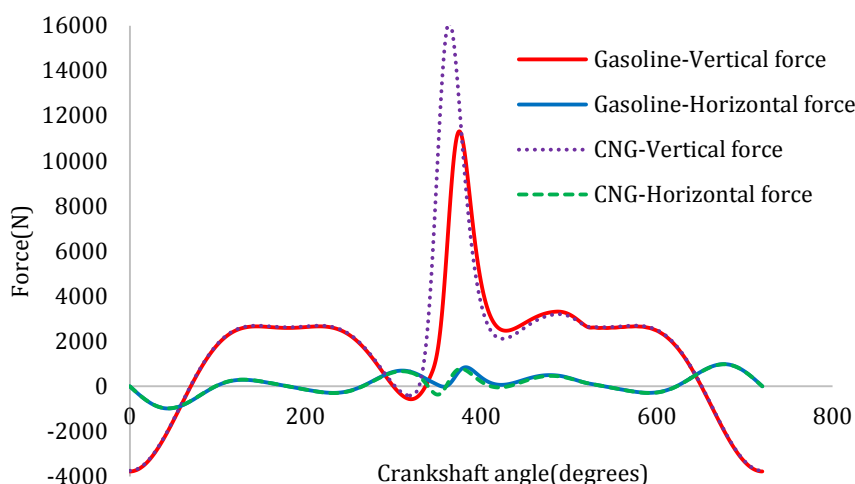
شرایط مرزی سمبه در تحلیل ترمومکانیکی و سپس پیش‌بینی عمر خستگی باید محاسبه شود. برای این منظور از نرم‌افزار جی‌تی‌پاور برای شبیه‌سازی تک‌بعدی فرآیند احتراق موتور استفاده شده است. در شکل ۴ نمودار فشار درون استوانه برحسب زاویه میل‌لنگ در دو وضعیت بنزین و گاز نشان داده شده است. از شکل ۴ ملاحظه می‌گردد که حداکثر فشار درون استوانه کمی پس از شروع احتراق رخ می‌دهد و شیب منحنی پس از احتراق کاهش می‌یابد.



شکل ۴ نمودار فشار درون استوانه در دو وضعیت بنزین و گاز

حداکثر فشار درون استوانه در وضعیت بنزین ۳۹٫۶ بار است که در زاویه ۳۷۵ درجه میل‌لنگ قابل مشاهده است. در وضعیت گاز نیز حداکثر فشار درون استوانه ۵۳٫۷ بار است که در زاویه ۳۶۴ درجه میل‌لنگ رخ داده است. افزایش فشار درون استوانه در وضعیت گاز نسبت به بنزین باتوجه به آوانس جرقه شمع بیشتر در وضعیت گاز و در نتیجه افزایش زمان احتراق آن قابل توجیه است. بعبارت دیگر مدت زمان احتراق در وضعیت گاز طبیعی بیشتر از بنزین است که این نکته باعث افزایش قابل توجه فشار درون استوانه در وضعیت گاز نسبت به بنزین می‌شود [۵، ۶].

باتوجه به نمودار آزاد سمبه که در شکل ۳-الف نشان داده شده است، یکی از نیروهای مهم اعمالی بر سمبه نیروی فشار گاز است. باتوجه به اینکه در وضعیت گاز طبیعی، فشار درون استوانه بصورت قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد، بنابراین می‌توان انتظار داشت که سمبه در این وضعیت نسبت به بنزین تنش ترمومکانیکی بیشتری را تحمل نماید که این نکته باعث کاهش عمر خستگی پرچرخه سمبه در وضعیت گاز نسبت به بنزین خواهد شد. با استفاده از نمودار فشار درون استوانه و رابطه‌های ۶ تا ۱۵ برنامه‌ای در نرم‌افزار متلب به منظور تحلیل نیروهای اعمالی بر سمبه نوشته شده است. در شکل ۵ نمودار نیروهای اعمالی بر سمبه در دو راستای عمود و افقی در دو وضعیت بنزین و گاز نشان داده شده است.



شکل ۵ نیروهای اعمالی بر سمبه در دو وضعیت بنزین و گاز

از شکل ۵ ملاحظه می‌گردد که حداکثر نیروی عمودی اعمالی بر سمبه در دو وضعیت بنزین و گاز در لحظه احتراق بترتیب ۱۱۳۰۹،۶۹ و ۱۶۱۵۰،۵۳ نیوتن است. نمودار نیروی افقی اعمالی بر سمبه در دو وضعیت بنزین و گاز تقریباً یکسان است.

۳-۲- تحلیل حرارتی

سمبه تنش‌های ترمومکانیکی ناشی از فشار احتراق و حرارت گاز را تحمل می‌نماید. خستگی ناشی از بارگذاری حرارتی و مکانیکی نقش تعیین‌کننده‌ای در ایجاد آسیب و کاهش عمر خستگی سمبه دارد [۷، ۱۰، ۱۱، ۱۸].

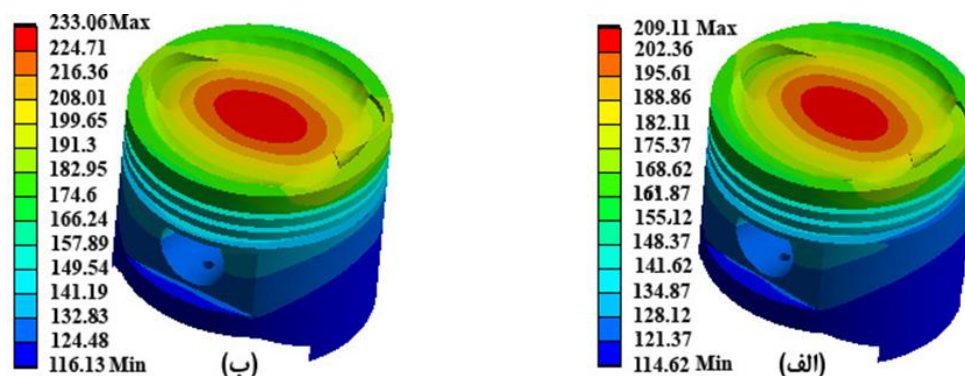
تحلیل حرارتی سمبه مهمترین گام در تحلیل مکانیکی و پیش‌بینی عمر خستگی آن است. زیرا پیش‌بینی دقیق توزیع دما در نقاط مختلف سمبه باعث افزایش دقت تحلیل مکانیکی در توزیع تنش‌های ترمومکانیکی در مختلف سمبه و در نهایت پیش‌بینی دقیق عمر خستگی آن خواهد شد [۷، ۱۰، ۳۰].

یک چرخه کامل موتور در تحلیل حرارتی سمبه بصورت افزایش دمای سمبه از دمای محیط تا دمای بیشینه‌ی کاری موتور و سپس کاهش دمای سمبه تا دمای محیط مورد تحلیل قرار گرفته است.

نتایج تحلیل حرارتی سمبه در وضعیت بنزین در شکل ۶-الف نشان داده شده است. نتایج تحلیل حرارتی نشان می‌دهد که دمای بیشینه در سمبه ۲۰۹،۱۱ درجه سانتیگراد است و در مرکز تاج سمبه رخ داده است که ناشی از همگرایی گازهای ناشی از احتراق موتور در این ناحیه است. حداقل دمای سمبه ۱۱۴،۶۲ درجه سانتیگراد است که در انتهای دامن آن قابل مشاهده است و توزیع دما از سطح سمبه تا انتهای دامن آن کاهش می‌یابد. این نتیجه با پژوهش‌های تحلیل حرارتی سمبه در منابع [۳، ۱۰، ۱۴، ۳۰، ۳۱] مطابقت دارد.

در شکل ۶-ب توزیع دما در سمبه در وضعیت گاز نشان داده شده است. دمای بیشینه در سمبه در وضعیت گاز ۲۳۳،۰۶ درجه سانتیگراد است و در مرکز تاج سمبه قابل مشاهده است که مشابه وضعیت بنزین توزیع دما از سطح سمبه تا انتهای دامن آن کاهش می‌یابد. حداقل دمای سمبه ۱۱۶،۱۳ درجه سانتیگراد است که در انتهای دامن آن قابل مشاهده است.

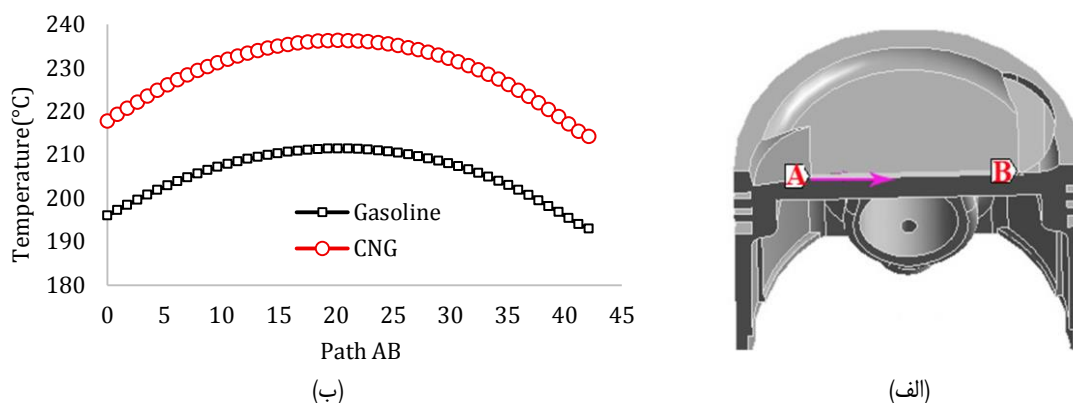
بررسی شکل ۶ نشان می‌دهد که سطح تاج سمبه از دیدگاه تحلیل حرارتی بحرانی است و سمبه در وضعیت گاز نسبت به بنزین حدود ۲۴ درجه سانتیگراد دمای بیشتری را تحمل می‌کند. بنابراین استفاده از گاز به جای بنزین باعث افزایش دمای سمبه در حدود ۱۱،۵ درصد خواهد شد. فشار و دمای درون استوانه با توجه به آوانس بیشتر جرقه شمع در وضعیت گاز نسبت به بنزین بصورت قابل ملاحظه‌ای افزایش خواهد یافت [۵، ۶].



شکل ۶ توزیع دما در سمبه در وضعیت الف) بنزین و ب) گاز

بنابراین ضریب انتقال حرارت متوسط جابه‌جایی و دمای متوسط چرخه‌ی که مطابق روابط ۴ و ۵ محاسبه شده است و بر تاج سمبه اعمال می‌شود، در وضعیت گاز نسبت به بنزین بیشتر است که این نکته باعث افزایش دمای سمبه در وضعیت گاز نسبت به بنزین بویژه در تاج آن خواهد شد. در نتیجه می‌توان انتظار داشت که سمبه در وضعیت گاز نسبت به بنزین تنش ترمومکانیکی بیشتری را تحمل نماید که این موضوع باعث کاهش عمر خستگی پرچرخه سمبه در وضعیت گاز نسبت به بنزین خواهد شد. در انتهای دامن سمبه نیز که حداقل دما در این ناحیه رخ می‌دهد، سمبه در وضعیت گاز نسبت به بنزین حدود ۱,۵ درجه سانتیگراد دمای بیشتری را تحمل می‌کند.

باتوجه به نتایج تحلیل حرارتی که نشان می‌دهد سطح تاج سمبه بحرانی است، مسیر AB به منظور بررسی بیشتر اثر گاز بر دمای سمبه مطابق شکل ۷ تعریف شده است. نتایج تحلیل حرارتی در دو وضعیت بنزین و گاز در مسیر AB در شکل ۷ نشان داده شده است. بررسی شکل مذکور نشان می‌دهد که سمبه در وضعیت گاز نسبت به بنزین حدود ۲۴ درجه سانتیگراد دمای بیشتری را تحمل می‌کند و مرکز تاج سمبه از دیدگاه تحلیل حرارتی بحرانی است و دمای بیشینه در دو وضعیت بنزین و گاز در این نقطه قابل مشاهده است.



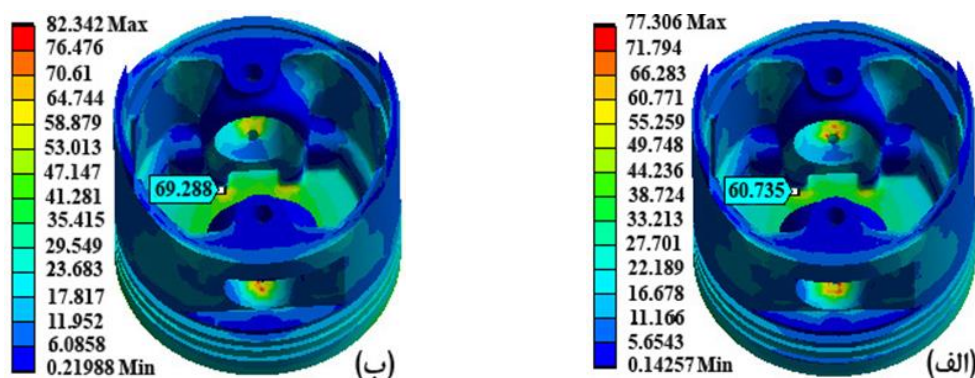
شکل ۷ تاج سمبه و اثر نوع سوخت بر دمای تاج، الف) تعریف مسیر AB در تاج سمبه و ب) تغییرات دما در مسیر AB در سطح تاج سمبه در دو وضعیت بنزین و گاز

۳-۳- تحلیل مکانیکی

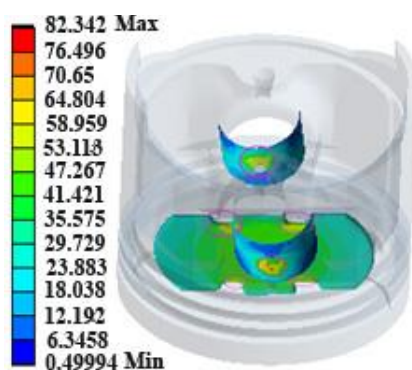
سمبه یکی از قطعات مهم موتور است که تنش‌های ترمومکانیکی ناشی از فشار احتراق و حرارت گاز را تحمل می‌نماید و باتوجه به اینکه در معرض تغییرات شدید دما و فشار احتراق قرار دارد، قطعه‌ای بسیار بحرانی است. بنابراین تحلیل ترمومکانیکی تنش‌های اعمالی بر سمبه به منظور پیش‌بینی عمر خستگی پرچرخه آن لازم و ضروری است. هدف تحلیل

مکانیکی شناسایی نقاط بحرانی است. براین اساس نقاطی از سمبه که بیشینه تنش ترمومکانیکی را تحمل می‌کنند از دیدگاه تحلیل مکانیکی بحرانی هستند [۱-۳]. براساس نتایج تحقیقاتی که در زمینه تحلیل تنش و عمر خستگی سمبه انجام شده است، افزایش دقت توزیع تنش در تحلیل مکانیکی باعث افزایش دقت پیش‌بینی عمر خستگی سمبه خواهد شد [۲، ۷، ۱۰، ۱۴]. توزیع دمای بدست آمده از تحلیل حرارتی به همراه نیروهای فشار گاز، اینرسی و جانی در تحلیل مکانیکی بر سمبه اعمال می‌شود [۱، ۷، ۱۰، ۱۴، ۱۸]. نتایج تحلیل مکانیکی سمبه در وضعیت بنزین در شکل ۸-الف نشان داده شده است. نتایج تحلیل مکانیکی نشان می‌دهد که بیشینه تنش وان مایسس در سمبه ۷۷,۳۰۶ مگاپاسکال است و در ناحیه بالایی محور سمبه رخ داده است. حداقل تنش سمبه ۰,۱۴ مگاپاسکال است که در انتهای دامن آن قابل مشاهده است. این نتیجه با پژوهش‌های تحلیل مکانیکی سمبه در منابع [۷، ۱۰، ۱۱، ۱۴، ۱۸] مطابقت دارد. یکی دیگر از نواحی بحرانی سمبه موتور M13 براساس نتایج تحلیل مکانیکی که در شکل ۶-الف نشان داده شده است، محل اتصال تکیه‌گاه محور سمبه و ناحیه زیرین تاج سمبه است که بیشینه تنش وان مایسس در این ناحیه ۶۰,۷۳۵ مگاپاسکال است.

توزیع تنش وان مایسس در سمبه در وضعیت گاز در شکل ۸-ب داده است. بیشینه تنش وان مایسس در سمبه در وضعیت گاز ۸۲,۳۴۲ مگاپاسکال است که مشابه وضعیت بنزین در ناحیه بالایی محور سمبه قابل مشاهده است. حداقل تنش سمبه ۰,۲۱۹۸۸ مگاپاسکال است که در انتهای دامن آن قابل رخ داده است. مقدار تنش در محل اتصال تکیه‌گاه محور سمبه و ناحیه زیرین تاج سمبه که یکی دیگر از نواحی بحرانی سمبه است، ۶۹,۲۸۸ مگاپاسکال است. نواحی بحرانی سمبه در وضعیت گاز در شکل ۹ نشان داده شده است. بررسی شکل ۹ نشان می‌دهد که ناحیه بالایی محور سمبه از دیدگاه تحلیل مکانیکی بحرانی است و سمبه در وضعیت گاز نسبت به بنزین حدود ۵,۰۳۶ مگاپاسکال تنش بیشتری را تحمل می‌کند. بنابراین استفاده از گاز به جای بنزین باعث افزایش تنش سمبه در حدود ۶,۵ درصد خواهد شد.

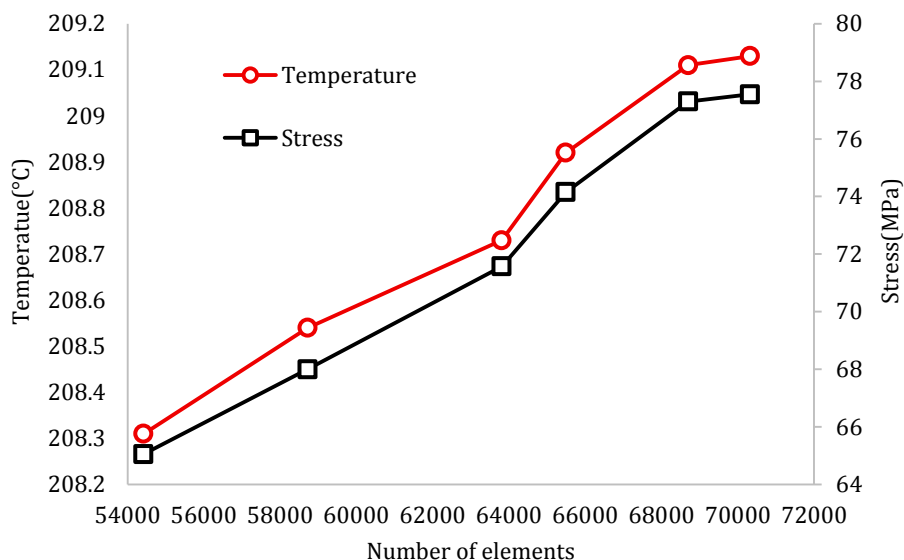


شکل ۸ توزیع تنش در سمبه در وضعیت الف) بنزین و ب) گاز



شکل ۹ نواحی بحرانی سمبه از دیدگاه تحلیل مکانیکی در وضعیت گاز

در شکل ۱۰ نتایج تحلیل ترمومکانیکی سمبه در وضعیت بنزین برحسب تعداد جزء مورد استفاده در شبکه بندی نشان داده شده است. همانطور که در شکل ۱۰ مشاهده می شود، با افزایش تعداد جزء، تغییرات دما ناچیز است. مقدار تنش وان مایسس با افزایش تعداد جزء بیش از ۶۸۷۰۱ جزء، تغییر قابل توجهی نمی کند. بنابراین بهترین تعداد جزء ۶۸۷۰۱ است.



شکل ۱۰ همگرایی شبکه بندی در سمبه در وضعیت بنزین

۳-۴- تحلیل خستگی پرچرخه

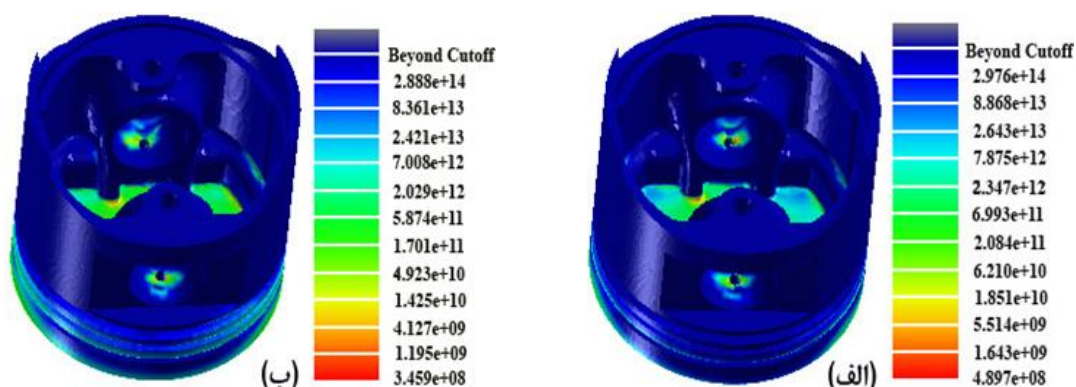
تنش های ترمومکانیکی ناشی از فشار احتراق و حرارت گاز بر سمبه اعمال می شود. خستگی ناشی از بارگذاری حرارتی و مکانیکی نقش تعیین کننده ای در ایجاد آسیب و کاهش عمر خستگی سمبه دارد. در این پژوهش یک چرخه کامل موتور بصورت افزایش دمای سمبه از دمای محیط تا دمای بیشینه ی کاری موتور و سپس کاهش دمای سمبه تا دمای محیط مورد تحلیل حرارتی قرار گرفته است. سپس تحلیل مکانیکی سمبه در دو مرحله با استفاده از نتایج تحلیل حرارتی و نیروهای اعمالی بر سمبه که در شکل ۵ نشان داد شده است، انجام شده است.

در گام آخر تاریخچه تنش ترمومکانیکی اعمالی بر سمبه به منظور محاسبه عمر خستگی پرچرخه سمبه و شناسایی نقاط بحرانی آن بر اساس معیار گودمن وارد نرم افزار انسیس ان کد دیزاین شده است. با توجه به اینکه بیشینه تنش در ناحیه بالایی محور سمبه رخ داده است می توان انتظار داشت که حداقل عمر خستگی در این ناحیه رخ دهد [۷، ۱۰، ۱۱، ۱۴].

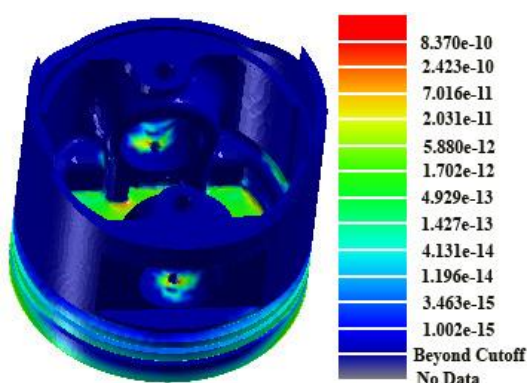
نتایج تحلیل ترمومکانیکی نشان می دهد که تنش های اعمالی سمبه از حد تسلیم تجاوز نمی کند. بنابراین همانطور که در قسمت ۳-۲ بیان گردید، خستگی سمبه از نوع پرچرخه است. نتایج تحلیل خستگی پرچرخه سمبه در وضعیت بنزین در شکل ۱۱-الف نشان داده شده است.

بررسی شکل مذکور نشان می دهد که حداقل عمر خستگی پرچرخه سمبه $4,897 \times 10^8$ چرخه است و در ناحیه بالایی محور سمبه قابل مشاهده است. بنابراین این ناحیه بحرانی است همچنین نواحی محل اتصال تکیه گاه محور سمبه و ناحیه زیرین تاج سمبه نیز از دیدگاه عمر خستگی پرچرخه بحرانی هستند. با بررسی شکل های ۷ و ۸ ملاحظه می شود که نواحی بحرانی در تحلیل ترمومکانیکی و عمر خستگی پرچرخه با یکدیگر مطابقت دارند. عمر خستگی سمبه از ۱۰۰۰۰ چرخه بیشتر است که نشان می دهد سمبه تحت خستگی پرچرخه قرار دارد [۳۳].

نتایج تحلیل پرچرخه سمبه در وضعیت گاز در شکل ۱۱-ب نشان داده شده است. حداقل عمر خستگی پرچرخه سمبه در وضعیت گاز $3,459 \times 10^8$ چرخه است که مشابه وضعیت بنزین در ناحیه بالای محور سمبه رخ داده است. بررسی نتایج تحلیل خستگی نشان می‌دهد که عمر خستگی سمبه در وضعیت گاز نسبت به بنزین حدود $1,438 \times 10^8$ چرخه کمتر است. بنابراین استفاده از گاز به جای بنزین باعث کاهش عمر خستگی پرچرخه سمبه در حدود ۲۹ درصد خواهد شد. توزیع آسیب خستگی در شکل ۱۲ در وضعیت گاز نشان داده شده است. از شکل مذکور ملاحظه می‌شود که علاوه بر ناحیه بالای محور سمبه که بحرانی‌ترین ناحیه است و حداکثر تنش وان مایسس و حداقل عمر خستگی پرچرخه در آن قابل مشاهده است، محل اتصال تکیه‌گاه محور سمبه و ناحیه زیرین تاج سمبه نیز مستعد ایجاد ترک خستگی هستند.



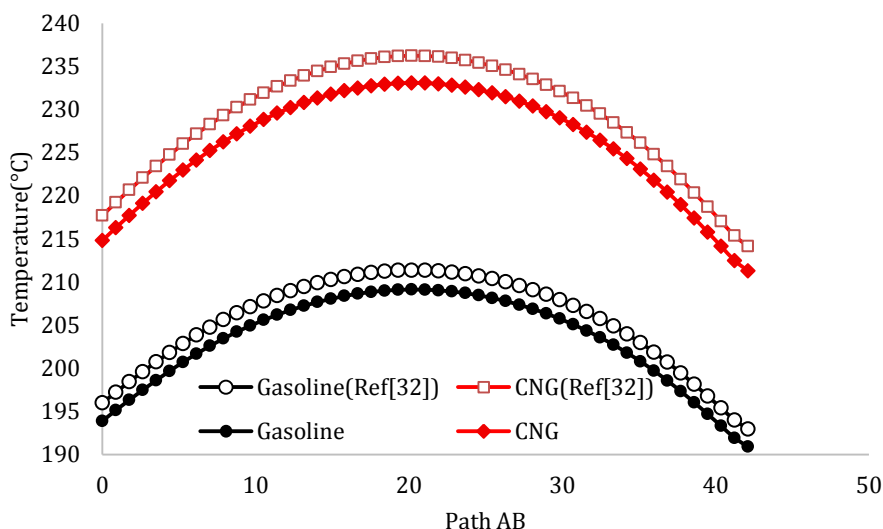
شکل ۱۱ عمر خستگی پرچرخه در سمبه در وضعیت (الف) بنزین و (ب) گاز



شکل ۱۲ توزیع آسیب خستگی در سمبه در وضعیت گاز

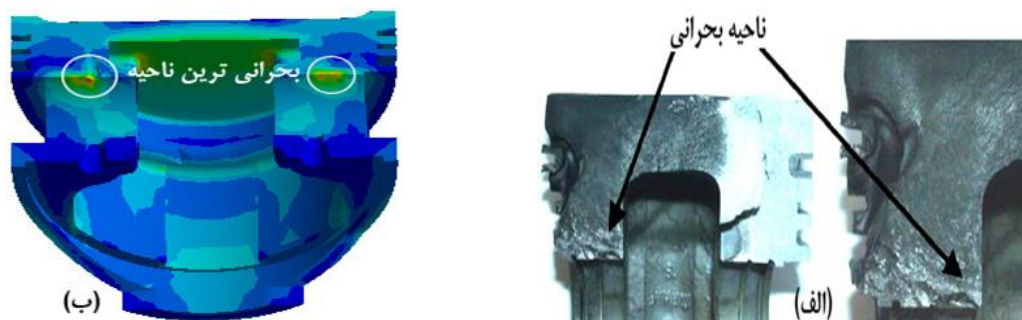
۳-۵- اعتبار سنجی نتایج تحلیل اجزای محدود

به منظور ارزیابی نتایج تحلیل ترمومکانیکی و عمر خستگی پرچرخه سمبه از نتایج پژوهش منبع [۳۲] استفاده شده است. در این پژوهش اثر سوخت گاز طبیعی بر دمای سمبه موتور M13 با شبیه‌سازی نصف سمبه بررسی شده است. در منبع مذکور دمای بیشینه در سمبه در وضعیت بنزین و گاز به ترتیب ۲۱۱,۳۶ و ۲۳۶,۲۱ درجه سانتیگراد و در مرکز تاج سمبه پیش‌بینی شده است. دمای بیشینه در این پژوهش در وضعیت بنزین و گاز به ترتیب ۲۰۹,۱۱ و ۲۳۳,۰۶ درجه سانتیگراد و در مرکز تاج سمبه قابل مشاهده است. بنابراین انطباق بسیار مناسبی بین نتایج تحلیل حرارتی این پژوهش و منبع [۳۲] وجود دارد. نتایج تحلیل حرارتی منبع [۳۲] و تغییرات دما در مسیر AB سطح تاج سمبه که از نظر تحلیل حرارتی ناحیه بحرانی سمبه محسوب می‌شود، در شکل ۱۲ مقایسه شده است. بررسی شکل ۱۳ نشان می‌دهد که انطباق بسیار مناسبی بین نتایج تحلیل حرارتی و منبع [۳۲] وجود دارد.



شکل ۱۳ مقایسه تغییرات دما در مسیر AB سطح تاج سمبه با نتایج منبع [۳۲]

نتایج تحلیل اجزای محدود نشان می‌دهد که ناحیه بالایی محور سمبه بحرانی‌ترین ناحیه است و حداکثر تنش وان مایسس و حداقل عمر خستگی پرچرخه در آن قابل مشاهده است. سمبه آسیب دیده در شرایط واقعی کارکرد موتور در شکل ۱۴-الف نشان داده شده است که محل ایجاد ترک در ناحیه بالایی پین سمبه قرار دارد. این نتیجه با نتایج تحلیل ترمومکانیکی و تحلیل خستگی پرچرخه سمبه که حداکثر تنش ترمومکانیکی و حداقل عمر خستگی پرچرخه در ناحیه مذکور رخ داده است، مطابقت دارد. بحرانی‌ترین ناحیه سمبه در پژوهش حاضر در ۱۴-ب نشان داده شده است.



شکل ۱۴ الف) سمبه گسیخته شده در شرایط واقعی در پژوهش سیلوا [۳۵] و ب) بحرانی‌ترین ناحیه سمبه در پژوهش حاضر

۴- نتیجه‌گیری

هدف این پژوهش ارزیابی عمر خستگی پرچرخه سمبه موتور M13 با تغییر سوخت از بنزین به گاز طبیعی است. با استفاده از روش تحلیل اجزای محدود امکان پیش‌بینی دقیق و قابل اطمینان توزیع دما، تنش و عمر خستگی پرچرخه سمبه وجود دارد. آوانس جرعه شمع بیشتر در وضعیت گاز نسبت به بنزین باعث افزایش مدت زمان احتراق گاز نسبت به بنزین خواهد شد.

بنابراین اجزای مختلف محفظه احتراق و سمبه دمای بیشتری را در وضعیت گاز نسبت به بنزین تحمل خواهند نمود که این نکته باعث افزایش تنش ترمومکانیکی اعمالی بر سمبه در وضعیت گاز نسبت به بنزین خواهد شد. در نتیجه عمر خستگی پرچرخه سمبه بعلاوه تحمل تنش ترمومکانیکی بیشتر در وضعیت گاز نسبت به بنزین بصورت قابل ملاحظه‌ای کاهش خواهد یافت.

نتایج تحلیل حرارتی نشان داد که دمای بیشینه در سمبه در وضعیت بنزین و گاز بترتیب ۲۰۹,۱۱ و ۲۳۳۶,۰۶ درجه سانتیگراد است که در مرکز تاج سمبه قابل مشاهده است. عبارت دیگر سمبه در وضعیت گاز نسبت به بنزین حدود ۲۴ درجه سانتیگراد دمای بیشتری را تحمل می‌کند. بنابراین استفاده از گاز به جای بنزین باعث افزایش دمای سمبه در حدود ۱۱,۵ درصد خواهد شد.

تنش وان مایسس بیشینه در سمبه در وضعیت بنزین و گاز بترتیب ۷۷,۳۰۶ و ۸۲,۳۴۲ مگاپاسکال در ناحیه بالایی محور سمبه محاسبه گردید. نتایج تحلیل مکانیکی نشان داد که سمبه در وضعیت گاز نسبت به بنزین حدود ۵,۰۳۶ مگاپاسکال تنش بیشتری را تحمل می‌کند. بنابراین استفاده از گاز به جای بنزین باعث افزایش تنش سمبه در حدود ۶,۵ درصد خواهد شد.

براساس نتایج تحلیل عمر خستگی پرچرخه حداقل تعداد چرخه‌های گسیختگی سمبه در وضعیت بنزین و گاز بترتیب $۴,۸۹۷ \times 10^8$ و $۳,۴۵۹ \times 10^8$ چرخه است که در ناحیه بالایی محور سمبه قابل مشاهده است. بنابراین عمر خستگی پرچرخه سمبه در وضعیت گاز نسبت به بنزین حدود $۱,۴۳۸ \times 10^8$ چرخه یا در حدود ۲۹ درصد کاهش خواهد یافت. نتایج تحلیل اجزای محدود نشان داد که علاوه بر ناحیه بالایی محور سمبه که بحرانی‌ترین ناحیه است و حداکثر تنش وان مایسس و حداقل عمر خستگی پرچرخه در آن قابل مشاهده است، محل اتصال تکیه‌گاه محور سمبه و ناحیه زیرین تاج سمبه نیز مستعد ایجاد ترک خستگی هستند.

برای بررسی صحت نتایج تحلیل حرارتی، نتایج شبیه‌سازی شده با نتایج تحلیل سمبه سمبه در منبع [۳۲] مقایسه گردید و نشان داده شد که انطباق بسیار مناسبی بین نتایج تحلیل حرارتی سمبه در این پژوهش و منبع [۳۲] وجود دارد. نتایج شبیه‌سازی شده با نمونه واقعی سمبه آسیب دیده مقایسه گردید و نشان داده شد که نواحی بحرانی سمبه مطابقت مناسبی با نواحی گسیختگی در نمونه‌های واقعی دارد.

فهرست علائم

b	قطر داخل استوانه، m
h	هدایت جابه‌جایی، $W/m^2 \cdot ^\circ C$
k	هدایت حرارتی، $W/m \cdot ^\circ C$
l	طول دسته سمبه، m
n	بردار عمود
n	ضریب اطمینان
r	شعاع میل‌لنگ
P	فشار درون استوانه
U	سرعت متوسط سمبه
a_p	شتاب سمبه، m^2/s
a_G	شتاب مرکز جرم سمبه، m^2/s
m_p	جرم سمبه
I_G	گشتاور لختی مرکز جرم دسته سمبه، kg/m^2
h_g	ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی، $W/m^2 \cdot ^\circ C$
T_g	دمای گاز درون استوانه، $^\circ C$
\bar{h}_g	ضریب انتقال حرارت متوسط جابه‌جایی، $W/m^2 \cdot ^\circ C$
\bar{T}_g	دمای متوسط چرخه، $^\circ C$

علائم یونانی

α	گسیلمندی
σ_a	دامنه تنش، MPa
σ_e	حد خستگی، MPa
σ_{ult}	مقاومت کششی، MPa
σ_{mean}	تنش میانگین، MPa

References

- [1] Balaji A, Kute SL, Sreenivasulu T, Giles R. Piston Durability Analysis including Side-Thrust Loads. SAE Technical Paper; 2020 Jan 24. doi: 10.4271/2019-32-0585
- [2] Chen Z, Li J, Liao J, Shi F. Stress and fatigue analysis of engine pistons using thermo-mechanical model. Journal of Mechanical Science and Technology. 2019 Sep;33(9):4199-207. doi: 10.1007/s12206-019-0815-y
- [3] Dagar N, Sharma R, Rinawa ML, Gupta S, Chaudhary V, Gupta P. Design and analysis of piston using aluminum alloy and composites in Solidworks and Ansys. Materials Today: Proceedings. 2022 Jan 1;67:784-91. doi: 10.1016/j.matpr.2022.07.318
- [4] Venkatachalam G, Kumaravel A. Experimental investigations on the failure of diesel engine piston. Materials Today: Proceedings. 2019 Jan 1;16:1196-203. doi: 10.1016/j.matpr.2019.05.214
- [5] Ferguson CR, Kirkpatrick AT. Internal combustion engines: applied thermosciences. John Wiley & Sons; 2015 Jul 1.
- [6] Ghorbanian J, Ahmadi M. Experimental thermal analysis of cylinder block and head of a bi-fuel turbocharged engine. Meccanica. 2012 Nov;47(8):1987-2004. doi: 10.1007/s11012-012-9569-7
- [7] Najafi M, Dastani H, Abedini M, Pirani S. Stress analysis and fatigue life assessment of a piston in an upgraded engine. Journal of Failure Analysis and Prevention. 2019 Apr 15;19(2):402-11. doi: 10.1007/s11668-019-00583-4
- [8] Liu Y, Li C, Jiang W, Yuan Y, Guo Z, Shi J. Optimization of thermal stress on the top surface of a particle-reinforced composite coated piston based on Kriging model. Case Studies in Thermal Engineering. 2025 May 1;69:106061. doi: 10.1016/j.csite.2025.106061
- [9] Yan J, Tong Q, Zhang W, Yuan Y, Jin S, Guo Z, Zhang H, Yu Y, Cao Z. Research on accelerated thermal fatigue testing and life prediction of Al-Si alloy pistons under start-stop cycles. International Journal of Fatigue. 2025 Feb 1;191:108677. doi: 10.1016/j.ijfatigue.2024.108677
- [10] Ashouri H. Fatigue life assessment for an aluminum alloy piston using stress gradient approach described in the FKM method. Journal of Solid Mechanics. 2022 Mar 30;14(1):57-66. doi: 10.22034/jsm.2021.1898031.1582
- [11] Ashouri H. Improving High Cycle Fatigue Life in A Gasoline Engine Piston using Oil Gallery with Considering Stress Gradient. International Journal of Advanced Design & Manufacturing Technology. 2021 Dec 1;14(4).
- [12] Xiong P, Liu S, Li Z, Deng L, Guo J, Shi L, Zhang J, Qiao X. A new accelerated thermal fatigue experiment method of pistons and its application. Engineering Failure Analysis. 2024 Sep 1;163:108599. doi: 10.1016/j.engfailanal.2024.108599
- [13] Wang G, Sun W, Chen L, Gao Y, Deng L, Xiong P, Zhang J. The wearing failure mechanism and optimization of diesel engine piston pinhole with copper bushing under ultra-high cylinder pressure. Engineering Failure Analysis. 2025 Mar 15;170:109288. doi: 10.1016/j.engfailanal.2025.109288
- [14] Ashouri H. Effect of residual stress on high cycle fatigue life of coated piston. Amirkabir Journal of Mechanical Engineering. 2025 Feb 19;56(12):1691-708. doi: 10.22060/mej.2025.23823.7817
- [15] Ashouri H, Afshari A. Effect of oil gallery on the piston thermo-mechanical stresses. Journal of New Applied and Computational Findings in Mechanical Systems. 2023;3(3):1-4.
- [16] Liu Y, Lei J, Chen J, Wang D, Yang H, Song G, Hou Q, Zhao H. A study on the co-optimization design method of diesel engine in-cylinder combustion performance and steel piston heat

- transfer characteristics: A new pit array combustion chamber structure. *Applied Thermal Engineering*. 2025 Feb 15;261:125112. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2024.125112
- [17] Wang B, Wang D, Lei J, Deng X, Liu Y, Yang H. Study on low-cycle fatigue life of diesel engine piston considering oil cooling gallery structure. *Applied Thermal Engineering*. 2025 Apr 1;264:125382. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2024.125382
- [18] Liu Y, Jing G, Liu H, Zhang W, Han M, Xiao S, Zhang Z. Failure analysis and design improvements of steel piston for a high-power marine diesel engine. *Engineering Failure Analysis*. 2022 Dec 1;142:106825. doi: 10.1016/j.engfailanal.2022.106825
- [19] Tan LG, Li GL, Tao C, Feng PF. Study on fatigue life prediction of thermal barrier coatings for high-power engine pistons. *Engineering Failure Analysis*. 2022 Aug 1;138:106335. doi: 10.1016/j.engfailanal.2022.106335
- [20] Gai S, Zhao J. Simulation and experimental investigation on fatigue resistance of the forged steel piston in high-duty engine. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2023 Apr;32(7):3202-14. doi: 10.1007/s11665-022-07316-z
- [21] Muthusamy J, Panithasan MS, Venkadesan G, Mariappan M. Computational and experimental analysis of yttria stabilized zirconia thermal barrier coated pistons: Impact on temperature distribution, microstructure, CRDI engine performance, emissions, and energy balance. *Applied Thermal Engineering*. 2025 May 15;267:125731. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2025.125731
- [22] Apaydin S, Doner N. Effects of piston cooling gallery geometry on temperature and flow in a heavy-duty diesel engine. *Thermal Science and Engineering Progress*. 2024 Jun 1;51:102644. doi: 10.1016/j.tsep.2024.102644
- [23] Ali SH, Ahmed YG, Ali AS. 3D Design and Analyses of an IC Engine Piston under Fatigue Test Conditions Using CNTs for the Next-Generation of Motorcycles. *SAE Technical Paper*; 2025 Apr 1. doi: 10.4271/2025-01-8359
- [24] Caldera M, Massone JM, Martinez RA. Failure analysis of a damaged direct injection diesel engine piston. *Journal of Failure Analysis and Prevention*. 2017 Oct;17(5):979-88. doi: 10.1007/s11668-017-0327-y
- [25] Deng X, Lei J, Wen J, Wen Z, Shen L. Numerical investigation on the oscillating flow and uneven heat transfer processes of the cooling oil inside a piston gallery. *Applied thermal engineering*. 2017 Nov 5;126:139-50. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2017.07.146
- [26] Niu D, Zhang J, Xiong P, Hao G, Liu S, Guo W. High temperature fatigue and oxidation characteristics of forged steel piston materials. *Engineering Failure Analysis*. 2019 Mar 1;97:220-6. doi: 10.1016/j.engfailanal.2019.01.014
- [27] Soni AK, Godara SS, Gade R, Brenia V, Shekhawat RS, Saxena KK, Prasad R. Modelling and thermal analysis for automobile piston using ANSYS. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*. 2023 Oct;17(5):2473-87. doi: 10.1007/s12008-022-01042-5
- [28] Wang W, Lu Y, Li Z, Li H. Simulations of engine knock flow field and wave-induced fatigue of a downsized gasoline engine. *International Journal of Engine Research*. 2021 Feb;22(2):554-68. doi: 10.1177/1468087419859791
- [29] Yao Z, Qian Z. Thermal analysis of nano ceramic coated piston used in natural gas engine. *Journal of Alloys and Compounds*. 2018 Nov 5;768:441-50. doi: 10.1016/j.jallcom.2018.07.278
- [30] Golbakhshi H, Namjoo M, Dowlati M, Khoshnam F. Evaluating the coupled thermo-mechanical stresses for an aluminum alloy piston used in a gasoline engine XU7. *The Journal of Engine Research*. 2016 Apr 10;42(42):33-42.
- [31] Pandian SG, Rengarajan SP, Babu TP, Natarajan V, Kanagasabesan H. Thermal and Structural Analysis of Functionally Graded NiCrAlY/YSZ/Al₂O₃ Coated Piston. *SAE International Journal of Materials and Manufacturing*. 2015 May 1;8(2):578-85. doi: 10.4271/2015-01-9081
- [32] Ashouri H, Ashouri R, Afshari A. Investigation of the effect of CNG fuel on the piston temperature of the M13 engine. In: *Proceedings of the 10th International Conference on Modern Research in Electrical, Computer, Mechanical and Mechatronics Engineering in Iran and Islamic World*; 2025; Tehran, Iran.
- [33] Wilson CE, Sadler JP. *Kinematics and dynamics of machinery*. Pearson; 2014.
- [34] Fatemi A, Fuchs HO, Stephens RI, Stephens RR. *Metal fatigue in engineering*. A Wiley-Interscience Publication. 2001.
- [35] Silva FS. Fatigue on engine pistons—A compendium of case studies. *Engineering failure analysis*. 2006 Apr 1;13(3):480-92. doi: 10.1016/j.engfailanal.2004.12.023