ISSN: 2476-6909; Modares Mechanical Engineering. Proceedings of the 6th National Conference on Mechanical-Civil Engineering and Advanced Technologies. 2024; 24(11):71-77.

Stress Analysis by Finite Element Method in the Exhaust Valve Without Coating and with Silicon Nitride Ceramic Coating in a Two-Stroke Diesel Engine

ARTICLE INFO

Authors
Majid chavoushi.[1*],
Ahmadreza Raisi Nafchi.[1]

[1] Department of Mechanical Engineering, Islamic Azad University, Borujen, Iran.

*** Correspondence**
Address: a.raisi1155@gmail.com

How to cite this article
Majid chavoushi, Ahmadreza Raisi Nafchi. Stress analysis by finite element method in the exhaust valve without coating and with silicon nitride ceramic coating in a two-stroke diesel engine. *Proceedings of the 6th National Conference on Mechanical-Civil Engineering and Advanced Technologies. 2024; 24(11):71-77.*

ABSTRACT

This paper investigates the finite element stress analysis of an uncoated and silicon nitride ceramic coated exhaust valve in a two-stroke diesel engine. The structure of this paper is based on the simulation of four exhaust valve models under three thermal, mechanical, and thermomechanical load conditions using ANSYS Workbench software. The models include an uncoated exhaust valve and three valves with Si_3N_4 ceramic coatings of thicknesses of 0.3, 0.4, and 0.5 mm. The base material of these four valve models is Nimonic80A alloy. The main objective of this research is to investigate the effect of exhaust gas temperature and Si_3N_4 ceramic coating on the stresses applied to the valve. The results show that the highest Von-Mises stress is in the valve seat plate area, with increasing exhaust gas temperature, the Von-Mises stress increases in all loading conditions, and the use of Si_3N_4 ceramic coating can help reduce Von-Mises stress at different points of the exhaust valve. In particular, Si_3N_4 coating with a thickness of 0.4 mm in the thermal and mechanical analysis and a thickness of 0.3 mm in the thermal-mechanical analysis is recommended to reduce Von-Mises stress at key points.

Keywords Exhaust Valve, Finite Element, ANSYS Workbench Software, Von-Mises Stress, Silicon Nitride Coating

ماهنامه علمی مهندسی مکانیک مدرس، ویژه‌نامه مجموعه مقالات ششمین کنفرانس ملی مهندسی مکانیک، عمران و فناوری‌های پیشرفته

تحلیل تنش به روش المان محدود در سوپاپ دود بدون پوشش و با پوشش سرامیکی سیلیسیم نیترید در یک موتور دیزل دوزمانه

مشخصات مقاله

نویسنده‌ها
مجیدچاووشی [۱*]
احمد رضا رئیسی نافچی [۱]

[۱] دانشگاه آزاد اسلامی، بروجن

*** احمد رضا رئیسی نافچی**
آدرس:
a.raisi1155@gmail.com

چکیده

این مقاله به بررسی تحلیل تنش به روش المان محدود در سوپاپ دود بدون پوشش و با پوشش سرامیکی سیلیسیم نیترید در یک موتور دیزل دو زمانه می‌پردازد. ساختار این مقاله بر شبیه‌سازی چهار مدل سوپاپ دود در سه حالت بار حرارتی، مکانیکی و حرارتی - مکانیکی با استفاده از نرم‌افزار انسیس ورکبنچ استوار گردیده است. مدل‌ها شامل یک سوپاپ دود بدون پوشش و سه سوپاپ با پوشش سرامیکی سیلیسیم نیترید به ضخامت‌های ۰/۳، ۰/۴ و ۰/۵ میلی‌متر هستند. جنس ماده پایه این چهار مدل سوپاپ آلیاژ نیمونیک ۸۰A است. هدف اصلی این پژوهش، بررسی تأثیر دمای گاز خروجی و پوشش سیلیسیم نیترید بر تنش‌های وارده بر سوپاپ است. نتایج نشان می‌دهند بیشترین مقدار تنش فون-میسز در ناحیه‌ی صفحه نشیمنگاه سوپاپ وجود دارد، با افزایش دمای گاز خروجی تنش فون-میسز در همه‌ی حالت بارگذاری افزایش‌یافته و استفاده از پوشش سیلیسیم نیترید می‌تواند به کاهش تنش فون-میسز در نقاط مختلف سوپاپ دود کمک کند. به‌طور خاص، پوشش سیلیسیم نیترید باضخامت ۰/۴ میلی‌متر در حالت تحلیل حرارتی و مکانیکی و ضخامت ۰/۳ میلی‌متر در تحلیل حرارتی-مکانیکی برای کاهش تنش فون-میسز در نقاط کلیدی توصیه شده است.

کلیدواژه‌ها سوپاپ دود، المان محدود، نرم افزار انسیس ورکبنچ، تنش فون-میسز، پوشش سیلیسیم نیترید

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2025-02-19]

۱- مقدمه

موتورهای دیزلی یکی از انواع موتورهای احتراق داخلی هستند که از فشرده‌سازی هوا برای مشتعل ساختن سوخت خود استفاده می‌کنند (احتراق تراکمی). فرایند فشرده‌سازی هوا توسط حرکت پیستون انجام می‌شود. موتورهای احتراق داخلی درنهایت گازهای خروجی با دما و فشار بالا تولید می‌کنند. موتورهای دیزلی در صنایع مختلف ازجمله نیروگاه‌ها، خودروسازی و حمل نقل دریای کاربرد دارند. موتورهای دیزلی مورد استفاده در کشتی‌ها معمولاً در سفرها و مأموریت‌های خود برای مدت طولانی کار می‌کنند؛ بنابراین قطعات آن‌ها به مدت طولانی در معرض فشار و دمای بالا حاصل از فرایند احتراق قرار می‌گیرند. دما و فشار بالا می‌تواند منجر به خرابی این قطعات شود و درنتیجه بر عملکرد موتور تأثیر منفی بگذارد. برای جلوگیری از این نوع خرابی‌ها نیاز است که روند تهویه و سرد کردن موتور به‌درستی انجام شود، از سوخت‌هایی باکیفیت بالاتر و دمای احتراق پایین‌تر استفاده شود و بر روی قطعات موتور از پوشش‌های سد حرارتی استفاده شود[1].

سوپاپ‌های دود از اجزای مهم و حیاتی در موتورهای دیزلی هستند و مسئولیت هوابندی محفظه احتراق و انتقال گازهای خروجی از سیلندر به سیستم خروجی را بر عهده دارند. سوپاپ‌های دود تحت تأثیر دما و فشار بالای گازهای خروجی حاصل از فرایند احتراق هستند. دمای بالا باعث کاهش سختی و استحکام مواد می‌شود[1-۳].

پاندی و همکارانش در سال ۲۰۱۲ در پژوهشی به این نتیجه دست یافتند که استفاده از مواد سرامیکی سبک در ساخت سوپاپ‌ها می‌تواند مقاومت شکست سوپاپ را در برابر دماهای بالا و تعداد زیاد چرخه افزایش دهد[3]. صادق البغدادی و همکارانش در سال ۲۰۱۶ در پژوهشی به این نتیجه دست یافتند که اگر سوپاپ دود با زیرکونات گادولینیوم که یک پوشش مانع حرارتی است پوشیده شود آنگاه توزیع گرادیان‌های دمایی، توزیع تنش فون- میسز و توزیع جابه‌جایی بر روی سوپاپ دود نسبت به زمانی که سوپاپ بدون پوشش است، کاهش می‌یابد[4]. سال ۱۳۸۲ عبدلی بز چلویی به تحلیل حرارتی و مکانیکی سوپاپ دود موتور پیکان ۱۶۰۰ پرداخت اما او تأثیر دمای گاز خروجی از سیلندر بر روی سوپاپ را در نظر نگرفت[۳]. باقری در سال ۱۳۸۸ با استفاده از روش المان محدود به تحلیل گذرای گرمایی و مکانیکی سوپاپ دودی که مربوط به موتور YXU بود پرداخت[1].

این مقاله به تحلیل تنش در سوپاپ دود مربوط به یک موتور دیزل دو زمانه می‌پردازد. موتور دیزل دو زمانه مذکور به‌عنوان موتور اصلی برای نیروی محرکه در کشتی‌ها استفاده می‌شود. در این پژوهش برخلاف کار عبدلی بز چلویی تأثیر دمای گاز خروجی از سیلندر بر سوپاپ دود مدنظر قرار خواهد گرفت. این پژوهش به دنبال ارائه راهکارهایی برای بهبود عملکرد سوپاپ‌های دود در موتورهای دیزل است. یکی از نوآوری‌های این پژوهش استفاده از پوشش سرامیکی سیلیسیم نیترید در صفحه احتراق سوپاپ دود و بررسی تأثیر آن و ضخامتش بر تنش‌های وارد شده بر سوپاپ دود بوده است. پوشش سرامیکی سیلیسیم نیترید قابلیت تحمل دمای بالا تا ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد و مقاومتی در برابر 10^9 چرخه بدون شکست را دارد.

۲- شرح مسئله

این مقاله با شبیه‌سازی چهار مدل سوپاپ دود به تجزیه‌وتحلیل توزیع تنش در آن‌ها می‌پردازد. بدین منظور از نرم‌افزار انسیس ورکبنچ که بر پایه روش المان محدود طراحی شده است، استفاده می‌شود. این چهار مدل سوپاپ دود عبارت‌اند از: سوپاپ دود با آلیاژ پایه نیمونیک گرید 80A و بدون پوشش سرامیکی، سوپاپ دود با آلیاژ پایه نیمونیک گرید 80A و پوشش سرامیکی سیلیسیم نیترید با ضخامت 0/3 میلی‌متر، سوپاپ دود با آلیاژ پایه نیمونیک گرید 80A و پوشش سرامیکی سیلیسیم نیترید با ضخامت 0/4 میلی‌متر و سوپاپ دود با آلیاژ پایه نیمونیک گرید 80A و پوشش سرامیکی سیلیسیم نیترید با ضخامت 0/5 میلی‌متر. سیلیسم نیترید که در این پژوهش به‌عنوان پوشش برای صفحه احتراق سوپاپ دود استفاده می‌شود یک ماده سرامیکی پرکاربرد در مهندسی است که با ایجاد پیوند کووالانسی بین اتم‌های سیلیسیم و نیتروژن تشکیل می‌شود. جدول ۱ به‌اندازه ابعاد سوپاپ دود و نشیمنگاه سوپاپ اشاره دارد. جدول ۲ بیانگر خواص فیزیکی، مکانیکی و حرارتی آلیاژ نیمونیک گرید 80A و جدول ۳ بیانگر خواص فیزیکی، مکانیکی و حرارتی سیلیسیم نیترید است.

جدول ۱) اندازه ابعاد سوپاپ دود و نشیمنگاه سوپاپ[۵]

نماد	پارامتر طراحی	مقدار (میلی‌متر)
d_2	قطر صفحه احتراق	181/52
b	عرض نشیمنگاه	17/4
d_0	قطر ساقه (میل) سوپاپ	40/2
l	طول ساقه (میل) سوپاپ	526/54
α	زاویه نشیمنگاه	۳۰ درجه
t	ضخامت صفحه سوپاپ	3/55

جدول ۲) خواص فیزیکی، مکانیکی و حرارتی آلیاژ نیمونیک گرید 80A [۶].

خواص فیزیکی	مقدار	واحد
چگالی	۸۱۹۰	$\frac{Kg}{m^3}$
نقطه ذوب	۱۳۲۰-۱۳۶۵	°C
خواص حرارتی	**مقدار**	**واحد**
ضریب انبساط حرارتی	$1/27\times10^{-5}$	$\frac{m}{m°C}$
هدایت حرارتی ایزوتروپیک	11/2	$\frac{W}{m°C}$

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2025-02-19]

ادامه جدول ۲) خواص فیزیکی، مکانیکی و حرارتی آلیاژ نیمونیک گرید 80A

خواص مکانیکی	مقدار	واحد
مدول یانگ	$2/25\times10^{11}$	Pa
ضریب پواسون	0/3	----
مدول حجمی	$1/875\times10^{11}$	Pa
مدول برشی	$8/654\times10^{10}$	Pa
استحکام کششی تسلیم	$7/8\times10^{8}$	Pa
استحکام کششی نهایی	$1/25\times10^{9}$	Pa

جدول۳) خواص فیزیکی، مکانیکی و حرارتی سیلیسیم نیترید

خواص فیزیکی	مقدار	واحد
چگالی	۳۲۱۰	$\frac{Kg}{m^3}$
نقطه ذوب	حدود ۱۹۰۰	℃
خواص حرارتی	**مقدار**	**واحد**
ضریب انبساط حرارتی	$3/2\times10^{-6}$	$\frac{m}{m℃}$
هدایت حرارتی ایزوتروپیک	۲۱	$\frac{W}{m℃}$
خواص مکانیکی	**مقدار**	**واحد**
مدول یانگ	$3/05\times10^{11}$	Pa
ضریب پواسون	0/26	-----
مدول حجمی	$2/12\times10^{11}$	Pa
مدول برشی	$1/21\times10^{11}$	Pa
استحکام کششی نهایی	$7/5\times10^{8}$	Pa

۳- روش حل مسئله

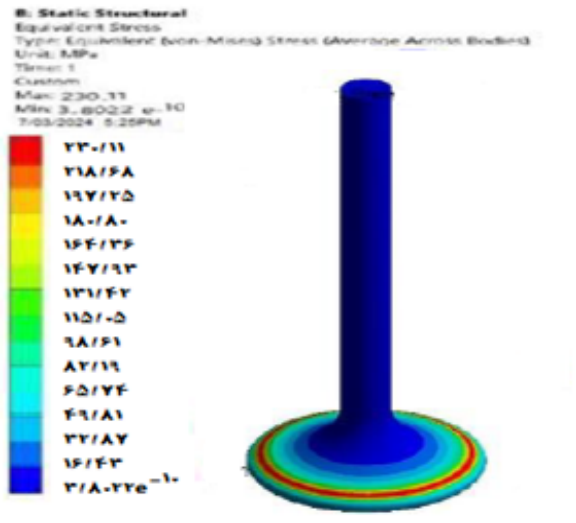
برای انجام شبیه‌سازی در نرم‌افزار انسیس ورکبنچ باید از جعبه‌ابزار (Toolbox) یکی از سیستم‌های تحلیلی (Analysis System)، توسط کاربر انتخاب شود. در این پژوهش از سیستم تحلیلی ساختار استاتیک (Static Structural)، استفاده می‌شود. پس از انتخاب این سیستم تحلیلی، تحلیل مربوطه با همه اجزایش به‌صورت شماتیک بر روی صفحه نمایش ظاهر می‌شود. در سلول داده‌های مهندسی (Engineering Data)، داده‌های مربوط به ویژگی‌ها و خصوصیات آلیاژ نیمونیک گرید 80A و سیلیسیم نیترید توسط کاربر وارد می‌شود. سپس با استفاده از امکانات سلول هندسه (Geometry)، مدل سه‌بعدی از سوپاپ ایجاد می‌شود. با استفاده از امکانات سلول مدل (Model)، مدل سه‌بعدی مرحله قبل مش بندی می‌شود. پارامترها مربوط به تنظیمات تحلیل که شامل شرایط مرزی، نوع بارگذاری و محدودیت‌ها هستند در سلول تنظیمات (Setup) وارد می‌شوند. دمای گازهای خروجی از سیلندر و فشار ناشی از احتراق از شرایط مرزی محیطی این مسئله هستند. در این پژوهش دما گاز خروجی برابر با ٤٢٠ درجه سانتی‌گراد و برای سوپاپ بدون پوشش علاوه بر دمای ٤٢٠ درجه سانتی‌گراد، دمای ٣٤٠ درجه سانتی‌گراد نیز بررسی می‌شود. فشار برابر با ١٤ مگاپاسکال و برای سوپاپ دود بدون پوشش فشار ٨ مگاپاسکال نیز بررسی می‌شود. نشیمنگاه سوپاپ دود در سیلندر به‌عنوان تکیه‌گاه ثابت در نظر گرفته می‌شود. پس از انجام این مراحل در سلول راه‌حل (Solution) با کلیک بر روی گزینه تنش‌ها (Stresses) و سپس انتخاب تنش فون-میسز و در نهایت کلیک بر روی حل (Solve) نرم‌افزار محاسبات لازم را انجام می‌دهد. سلول (Results)، نتایج مربوط به تحلیل‌ها را ارائه می‌کند. قابل‌ذکر است در این پژوهش سه نوع بارگذاری شامل حرارتی، مکانیکی و ترمومکانیکی مورد بررسی قرار می‌گیرد. باید سیستم تحلیلی مناسب برای هر نوع بارگذاری تنظیم شود.

۴- تفسیر نتایج

در این بخش به تحلیل حرارتی، مکانیکی و حرارتی-مکانیکی در ٤ مدل سوپاپ دود می‌پردازیم.

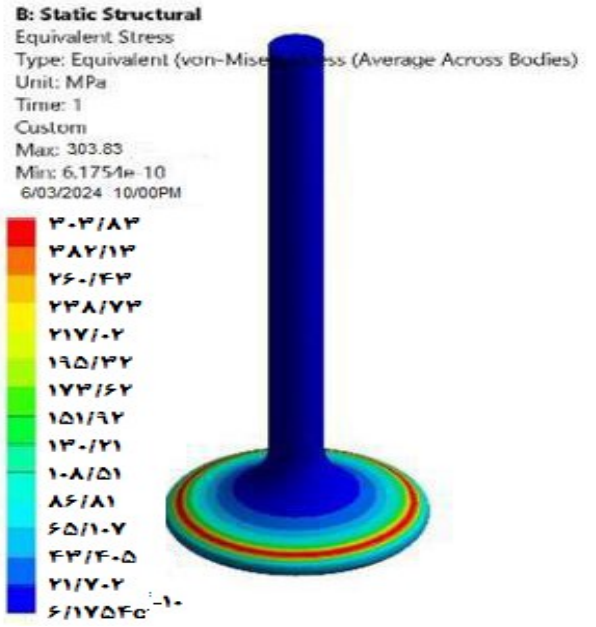
۴-۱- نتایج شبیه‌سازی تحلیل حرارتی در سوپاپ دود

شکل‌های ۱-الف و ۱-ب، مربوط به شبیه‌سازی سوپاپ دود بدون پوشش در تحلیل حرارتی و دمای گاز خروجی به ترتیب ٣٤٠ و ۴۲۰ درجه سانتی‌گراد هستند. شکل‌های ۱-ت، ۱-ث و ۱-ج، مربوط به نتایج شبیه‌سازی سوپاپ دود با پوشش سرامیکی سیلیسیم نیترید هستند. ضخامت پوشش سرامیکی در این شکل‌ها به ترتیب ۰/۳، ۰/٤ و ۰/۵ میلی‌متر و دمای گاز خروجی ٤٢٠ درجه سانتی‌گراد است. مشاهده می‌شود با افزایش دمای گاز خروجی از ٣٤٠ به ٤٢٠ درجه سانتی‌گراد، مقادیر تنش فون-میسز در سوپاپ دود بدون پوشش افزایش‌یافته است، بیش‌ترین مقدار تنش فون میسز در تحلیل حرارتی مربوط به ناحیه صفحه نشیمنگاه سوپاپ است. این امر به دلیل انبساط حرارتی سوپاپ و نشیمنگاه سوپاپ در سرسیلندر و وجود تکیه‌گاه‌های ثابت در بیرون نشیمنگاه سوپاپ است. تکیه‌گاه‌های ثابت در بیرون نشیمنگاه سوپاپ انبساط را محدود می‌کنند و به نشیمنگاه کمک می‌کنند تا فقط به سمت سوپاپ دود انبساط پیدا کند که این باعث فشار در ناحیه صفحه نشیمنگاه سوپاپ می‌شود. مقدار تنش فون-میسز در ناحیه‌ی صفحه نشیمنگاه با وجود تغییرات ضخامت پوشش نسبتاً ثابت و در حدود ٣٠٢-٣٠٣ مگاپاسکال است. برای کاهش تنش حرارتی، پوشش باضخامت ۰/٤ میلی‌متر پیشنهاد می‌شود.

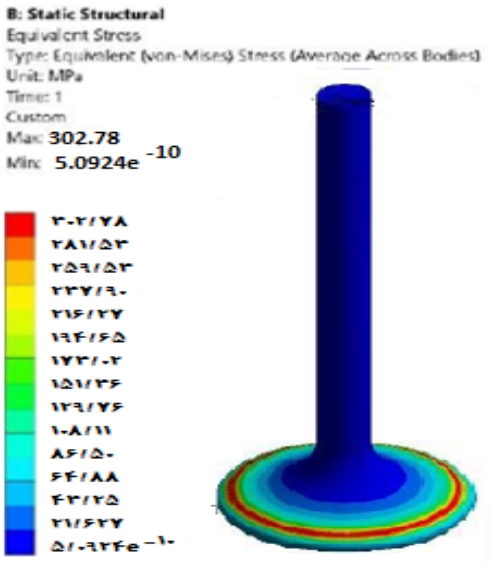


(الف)

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2025-02-19]

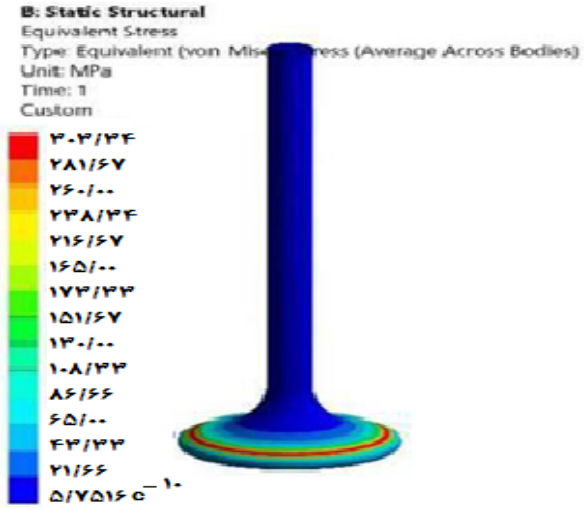


(ج)

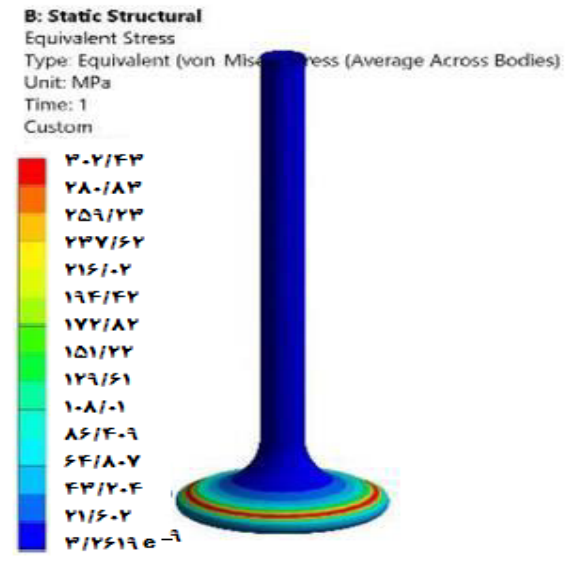


(ب)

شکل ۱) الف و ب) شبیه‌سازی سوپاپ دود بدون پوشش در دمای به ترتیب ۳۴۰ و ۴۲۰ درجه سانتی‌گراد. ت، ث و ج) شبیه‌سازی سوپاپ دود با پوشش سرامیکی به ضخامت به ترتیب 0/3، 0/4 و 0/5 و دمای ۴۲۰ درجه سانتی‌گراد در تحلیل حرارتی



(ت)

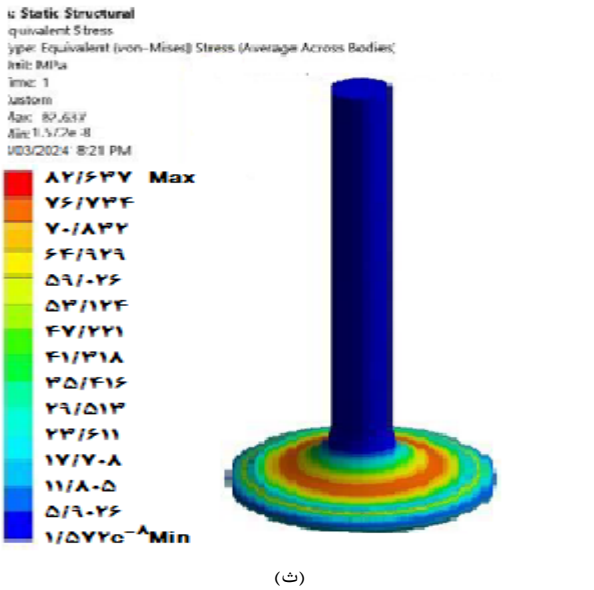


(ث)

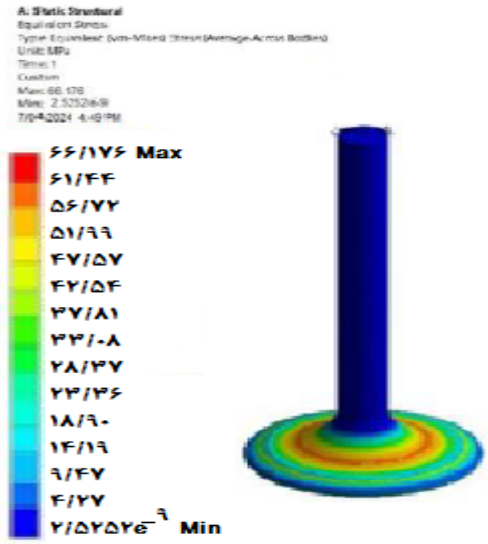
۴-۲- نتایج شبیه‌سازی تحلیل مکانیکی در سوپاپ دود

شکل‌های ۲-الف و ۲-ب، مربوط به شبیه‌سازی سوپاپ دود بدون پوشش در تحلیل مکانیکی و دمای گاز خروجی به ترتیب ۳۴۰ و ۴۲۰ درجه سانتی‌گراد هستند. شکل‌های ۲-ت، ۲-ث و ۲-ج، مربوط به نتایج شبیه‌سازی سوپاپ دود با پوشش سرامیکی سیلیسیم نیترید هستند. ضخامت پوشش سرامیکی در این شکل‌ها به ترتیب ۰/۳، ۰/۴ و ۰/۵ میلی‌متر و دمای گاز خروجی ۴۲۰ درجه سانتی‌گراد است. مشاهده می‌شود که مقادیر تنش فون-میسز در تحلیل مکانیکی کم‌تر از تحلیل حرارتی است، با افزایش دمای گاز خروجی از ۳۴۰ به ۴۲۰ درجه سانتی‌گراد، شاهد افزایش مقادیر تنش فون-میسز در سوپاپ دود بدون پوشش هستیم، استفاده از پوشش سرامیکی باضخامت ۰/۴ و ۰/۵ میلی‌متر باعث کاهش تنش فون-میسز در نقاط کلیدی این نوع سوپاپ شده است. بیشترین مقدار تنش فون-میسز در حالت تحلیل مکانیکی در ناحیه‌ی صفحه نشیمنگاه سوپاپ است، این امر به دلیل نقش این ناحیه به‌عنوان محل تماس با تکیه‌گاه سوپاپ در سیلندر است. هنگامی‌که سوپاپ بسته می‌شود، فشار زیادی از سوی سیلندر به این نقطه وارد می‌شود. سوپاپ دود باضخامت پوشش ۰/۴ میلی‌متر کم‌ترین مقدار تنش فون-میسز را با مقدار ۸۲/۶۳۷ مگاپاسکال در ناحیه‌ی صفحه نشیمنگاه خود دارد.

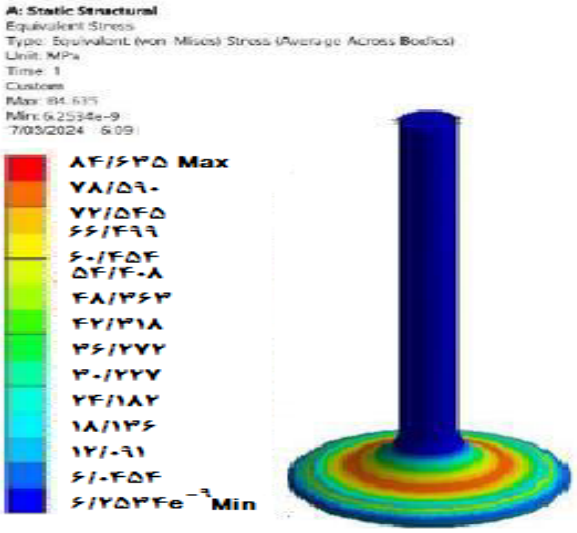
[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2025-02-19]



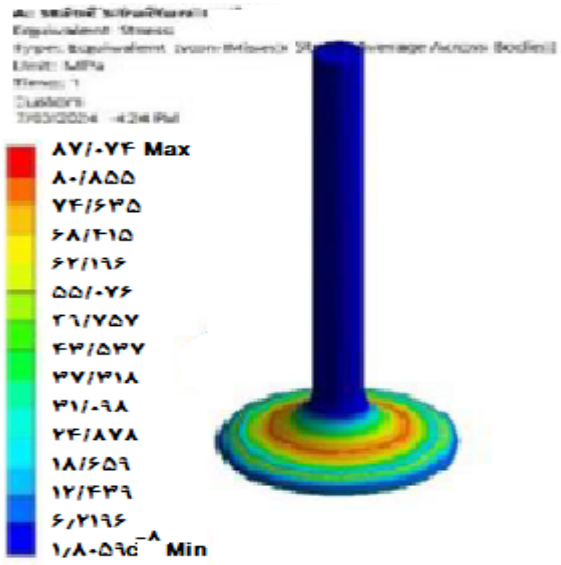
(ث)



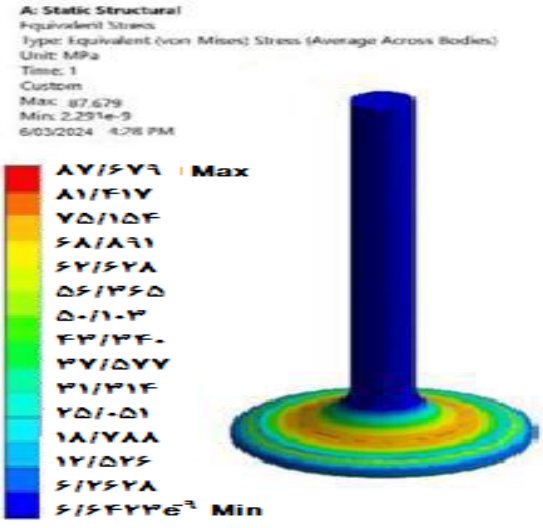
(الف)



(ج)



(ب)



(ت)

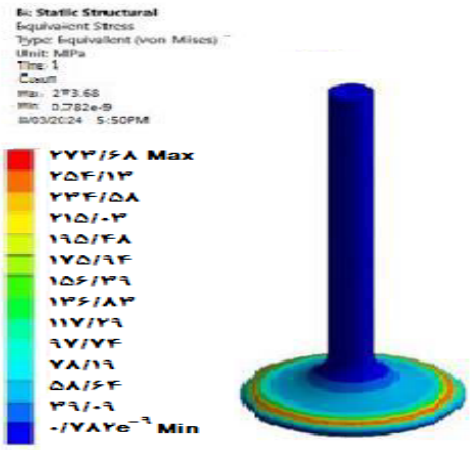
شکل۲) الف و ب) شبیه‌سازی سوپاپ دود بدون پوشش در دمای به ترتیب ۳۴۰ و ۴۲۰ درجه سانتی‌گراد. ت، ث و ج)شبیه‌سازی سوپاپ دود با پوشش سرامیکی به ضخامت به ترتیب 0/3، 0/4 و 0/5 و دمای ۴۲۰ درجه سانتی‌گراد در تحلیل مکانیکی

۴-۳- نتایج شبیه‌سازی تحلیل حرارتی-مکانیکی در سوپاپ دود

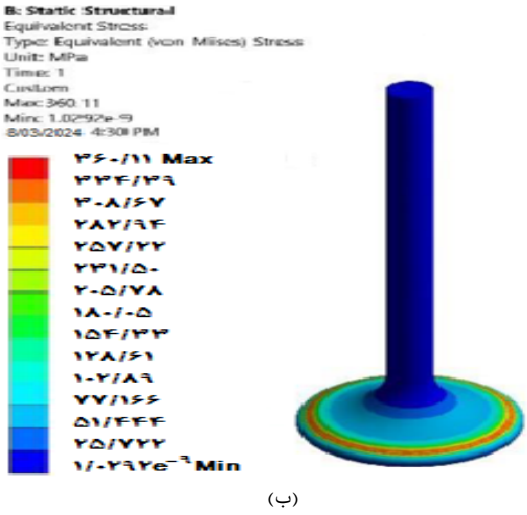
شکل‌های ۳-الف و ۳-ب، مربوط به شبیه‌سازی سوپاپ دود بدون پوشش در تحلیل حرارتی-مکانیکی و دمای گاز خروجی به ترتیب ۳۴۰ و ۴۲۰ درجه سانتی‌گراد هستند. شکل‌های ۳-ت، ۳-ث و ۳-ج، مربوط به نتایج شبیه‌سازی سوپاپ دود با پوشش سرامیکی سیلیسیم نیترید هستند. ضخامت پوشش سرامیکی در این شکل‌ها به ترتیب ۰/۳، ۰/۴ و ۰/۵ میلی‌متر و دمای گاز خروجی ۴۲۰ درجه سانتی‌گراد است. تحلیل انجام‌شده یک تحلیل حرارتی-مکانیکی است که تنش‌های ناشی از توزیع ناهمگن دما و بارهای مکانیکی را در نظر می‌گیرد. با افزایش دمای گاز خروجی از ۳۴۰ به ۴۲۰ درجه سانتی‌گراد، شاهد افزایش مقادیر تنش فون-میسز در

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2025-02-19]

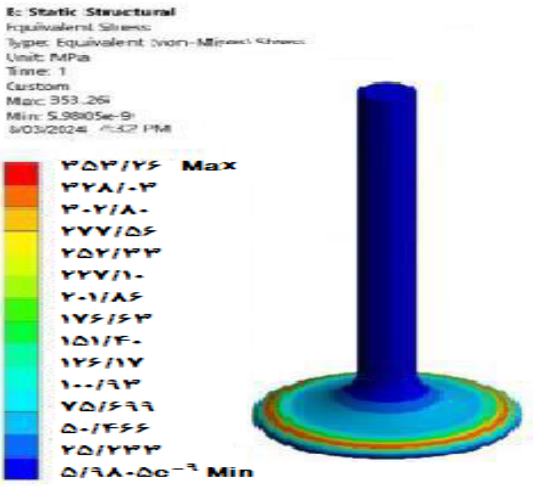
سوپاپ دود بدون پوشش هستیم. در همه‌ی سوپاپ‌های مورد بررسی در این تحلیل، بیشترین مقدار تنش فون-میسز در ناحیه‌ی صفحه نشیمنگاه سوپاپ درج‌شده است. استفاده از پوشش سرامیکی سیلیسیم نیترید باضخامت ۰/۳میلی‌متر یا ۰/۴میلی‌متر بر روی صفحه احتراق سوپاپ به کاهش تنش در نقاط کلیدی کمک کرده است.



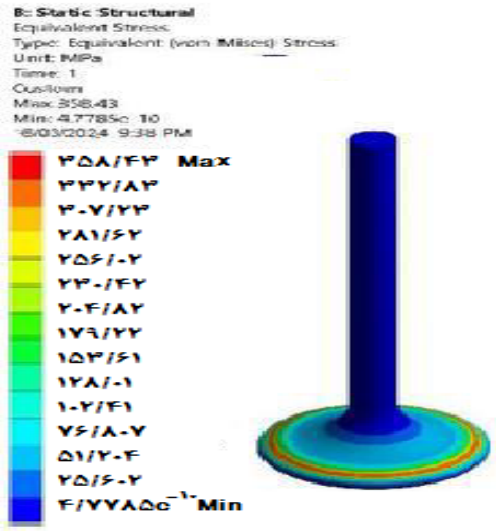
(الف)



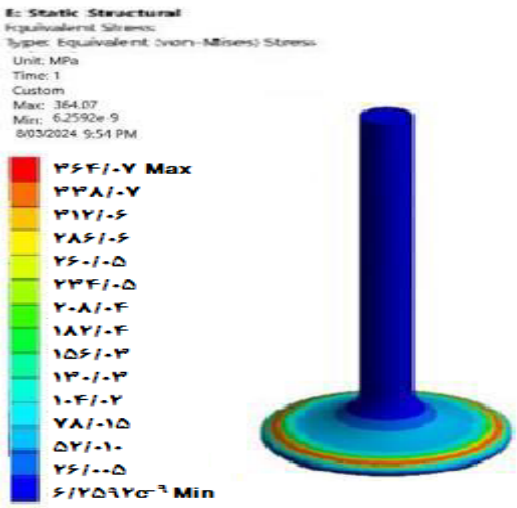
(ب)



(ت)



(ث)



(ج)

شکل۳) الف و ب) شبیه‌سازی سوپاپ دود بدون پوشش در دمای به ترتیب ۳۴۰ و ۴۲۰ درجه سانتی‌گراد. ت، ث و ج)شبیه‌سازی سوپاپ دود با پوشش سرامیکی به ضخامت به ترتیب 0/3، 0/4 و 0/5 و دمای ۴۲۰ درجه سانتی‌گراد در تحلیل حرارتی-مکانیکی

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله با عنوان «تحلیل تنش به روش المان محدود در سوپاپ دود بدون پوشش و با پوشش سرامیکی سیلیسم نیترید در یک موتور دیزل دو زمانه»، از شبیه‌سازی‌های حرارتی و مکانیکی برای ارزیابی تأثیر دمای گاز خروجی از سیلندر و همچنین تأثیر پوشش سرامیکی سیلیسیم نیترید بر روی تنش‌های فون-میسز در سوپاپ دود استفاده شد. نتایج نشان دادند که با افزایش دمای گاز خروجي تنش فون-میسز در همه‌ی حالت‌های بارگذاری افزایش‌یافته است. بیشترین مقدار تنش فون-میسز در ناحیه‌ی صفحه نشیمنگاه سوپاپ ثبت‌شده است. این امر به دلیل نقش این ناحیه به‌عنوان محل تماس با تکیه‌گاه سوپاپ در سیلندر و محدودیت انبساط توسط تکیه‌گاه‌های ثابت است. پوشش سرامیکی نواحی تنش‌زا را تغییر نمی‌دهد. استفاده از پوشش

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2025-02-19]

سرامیکی سیلیسیم نیترید به کاهش تنش فون-میسز در نقاط مختلف سوپاپ دود کمک کرده است. به‌طور خاص، پوشش سیلیسیم نیترید باضخامت ۰/۴ میلی‌متر در حالت تحلیل حرارتی و مکانیکی و ضخامت ۰/۳ میلی‌متر در تحلیل حرارتی-مکانیکی برای کاهش تنش فون-میسز در نقاط کلیدی توصیه می‌شود.

مراجع

1- Bagheri A. Transient Thermal and Mechanical Analysis of Exhaust Valve Using Finite Element Method. Journal of Mechanical Engineering. 2009; 39, 1. (In Persian).

2- Abdoli Bozcheloi D. Thermo-mechanical analysis of the exhaust valve of an internal combustion engine using the finite element method. Masters degree, Iran Institute of Science and Technoligy, 2003. (In Persian).

3- Pandey A, R.K Mandloi R.K, Raghuwanshi N.K. Failure Analysis of Internal Combustion Engine Valves: A Review. International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology. 2012; 1(2), 173-181.

4- Al-Baghdadi M, Ghadh N.A, Ahmed S.S. Mechanical and thermal stresses analysis in diesel engine exhaust valve with and without thermal coating layer on valve face. ENERGY AND ENVIRONMENT SPECIAL ISSUE ON APPLIED MECHANICS RESEARCH. 2016; 7(3), 253-262.

5- MAN Corporation. MAN B$W L35MC6. Project Guide (6thed). Denmark: MAN Diesel. 2009.

6- Gawale S.S. Design and Optimization of IC Engine's Exhaust Valve. International Engineering Research Journa. 2016; 8(4), 1014-1021.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2025-02-19]