ماهنامه رهیافتی در مدیریت نفت و گاز
دوره ۱، شماره ۲ (پیاپی:۲)، تیر ۱۳۹۹
صفحات ۳۰-۲۳

آنالیز و تحلیل پیستون موتورهای بنزینی با استفاده از سیمولیشن حرارتی نرم افزار سالیدورک

سید جاوید اطهر[۱]، میلاد فراهانی علوی[۲*]، عرفان حسینخانی مجد[۳]

۱- گروه مهندسی خودرو، انزلی
۲- گروه مهندسی مکانیک، همدان
۳- گروه مهندسی خودرو، انزلی

چکیده

پیستون یکی از قطعات مهمی در موتور است که عملکرد آن در موتور از اهمیت بالایی برخوردار است. در یک موتور احتراق داخلی بیشترین میزان حرارت در محفظه احتراق صورت می گیرد که احتراق حاصل از انفجار، بار و حرارت بالایی را به پیستون وارد میکند و نیروهای تراکمی و انبساطی را متحمل می شود. تحلیل حرارتی و محاسبه توزیع دما در پیستون برای کنترل تنش های حرارتی و تغییر شکل ها در محدوده مجاز، اهمیت دارد. در این مقاله تحلیل حرارتی و میزان اثر گذاری دما بر روی پیستون و تغییر شکل های انجام شده و همچنین نمودار و جداول حاصله با استفاده از نرم افزار سالیدورک ۲۰۱۶ مورد بررسی قرار گرفته است.

واژگان کلیدی: تحلیل حرارتی، پیستون، خودرو، سیمولیشن، سالیدورک

ماهنامه رهیافتی در مدیریت نفت و گاز
دوره ۱، شماره ۲ (پیاپی:۲)، تیر ۱۳۹۹
صفحات ۳۰-۲۳

۱- مقدمه

درون محفظه احتراق میتواند پیستون قطعه استوانه شکلی است که در داخل سیلندر با اتصال داشتن به شاتون حرکت رفت و برگشتی داشته، و زمان های موتور را به وجود می آورد. یک پیستون از قسمت های مختلفی از جمله تاج پیستون، دامنه پیستون، شیار رینگ ها و سوراخ گژن پین تشکیل شده است. چند شیار در قسمت سر پیستون قرار دارد که محل نصب رینگ های آن است و فضای بالای پیستون را نسبت به محفظه ی کارتر آب بندی می کند. همچنین روی پیستون سوراخی برای قرار گرفتن گژن پین جهت اتصال به شاتون تعبیه شده است [۱]. در موتورهای احتراق داخلی بیشترین فشار بر روی پیستون وارد می شود (فشار گاز درون محفظه احتراع می تواند به حدود bar ۱۸۰-۲۰۰ برسد) که سرعت خطی پیستون حدود m/s ۲۰ و دمای کف پیستون تا حدود $۴۰۰^{\circ}F$ می رسد و به عبارتی نیروی های تراکمی و انبساطی را متحمل می شود. جنس پیستون ها عمدا از آلومینیوم یا چدن ساخته می شود که پیستون های آلومینیومی به دلیل سبکی و انتقال حرارت و ارزان بودن بیشترین کاربرد را در صنعت خودرو سازی دارد که جهت ساخت پیستون از روش ریخته گری یا آهنگری استفاده می شود[۲]. در تحقیقی که بوسیله والدز ، کاسانوا و رویرا انجام شده، تحلیل پیستون با استفاده از روش اجزا محدود صورت گرفته است . در این مطالعه به بررسی تفاوت های بین پیستون آلومینیومی و پیستون ساخته شده از مواد کربنی، در رابطه با میزان انبساط حرارتی و هدایت حرارتی آنها پرداخته شده است . برای مقید کردن پیستون، چند گره بر روی دامن پیستون، مقید شده است [۳].

جهت ساخت پیستون از طرح های مختلفی در موتورهای مختلف استفاده می شود که باتوجه به کارکرد موتور تعیین می شود. یکی از تحلیل های حائز اهمیت در حوزه مسائل جامدات، تحلیل بارهای حرارتی می باشد. تشخیص و تعیین مقدار بار و دما بستگی به جنس، اندازه، تعیین و توزیع دقیق محدوده دمایی در جسم است. بیشترین دمای هر نقطه از پیستون نباید از % ۶۶ دمای ذوب آلیاژ مربوطه بیشتر شود .این محدوده دمایی برای آلیاژ پیستون موتورهای امروزی حدود $۶۴۰^{\circ}k$ است. تاج پیستون از جمله داغ ترین قطعه یک موتور احتراق داخلی است. به همین دلیل سیستم خنک کاری در درجه اول وظیفه دارد که دمای تاج پیستون را در حد مطلوب نگه دارد. زیرا اگر دمای تاج پیستون از حد بهینه خود بالاتر برود باعث افت کارایی و در نتیجه سوختگی پیستون خواهد شد. همچنین افت بیش از حد دمای پیستون باعث افزایش اتلاف حرارتی از آن میشود. بنابراین توصیه شده است که پیستون موتور احتراقی در محدوده بیشترین دمای کارکرد خود کار کند و نباید نرخ خنک کاری موتور طوری باشد که دمای پیستون را بیش از حد پایین آورد[۴،۵]. لذا جهت استحکام، انتقال حرارت بالا، خاصیت لغزشی، نقطه ذوب بالا، قابلیت حرارتی و قابلیت جذب روغن بیشتر، نوع پوشش پیستون ها را از جنس هایی همانند سرب، قلع، گرافیت، اکسید و... پوشش می دهند.

در این مقاله تحلیل حرارتی پیستون با دقت بالا و محاسبات دقیق با استفاده از سیمولیشن حرارتی نرم افزار سالیدورک در ناحیه رینگ ها و تاج پیستون مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است. همچنین به تحلیل تنش و تعیین نقاط بحرانی پیستون پرداخته شده است .تنش های حرارتی و مکانیکی به طور مجزا محاسبه و نشان داده شده که تنش های حرارتی در کنار تنش های مکانیکی اهمیت بالاتری دارند.

ماهنامه رهیافتی در مدیریت نفت و گاز
دوره ۱، شماره ۲ (پیاپی:۲)، تیر ۱۳۹۹
صفحات ۳۰-۲۳

۲- پیستون و کاربردهای آن

پیستون خودرو داخل سوراخ های ایجاد شده در داخل بلوک سیلندر (بوش سیلندر) ، بالا و پایین می رود و این حرکت طولی پیستون داخل سیلندر ، توسط شاتون به حرکت چرخشی تبدیل شده و به میل لنگ داده می شود. جهت افزایش قدرت و کشش خودرو از چندین سیلندر و پیستون در خودرو استفاده می کنند. به عنوان مثال، در دو مدل خودرو با اندازه پیستون های مشابه ، خودرویی که دارای پیستون بیشتری می باشد ، قدرت بیشتری خواهد داشت. بدیهی است که در بلوک سیلندر یک خودرو، به تعداد پیستون های آن بوش سیلندر تعبیه شده است. بنابراین هرچقدر تعداد پیستون های یک خودرو بیشتر شود ، حجم و اندازه بلوک سیلندر آن خودرو نیز افزایش پیدا می کند. به عبارتی اگر گفته شود خودرویی چهار سیلندر می باشد ، بلوک سیلندر آن ظرفیت قرارگیری چهار پیستون داخل آن را دارا می باشد [۶]. در هنگام حرکت پیستون، انبساط تا ۱۸۰۰۰ N (۴۰۰۰ lb) نیرو به طور ناگهانی به کف پیستون وارد می شود. هنگامی که خودرو افزایش سرعت داشته باشد، این حالت در هر سیلندر ۳۰ تا ۴۰ بار در ثانیه رخ می دهد. دمای کف پیستون به $۲۲۰۰^{\circ}C$ ($۴۰۰۰^{\circ}F$) یا بیشتر می رسد. پیستون از آلیاژ آلومینیوم ساخته می شود (آلیاژ آلومینیوم مخلوطی از آلومینیوم و فلز های دیگر است)، زیرا فلز سبکی است. وزن هر پیستون در حدود ۰/۴۵۰ kg (۱ lb) است. جهت کاهش وزن پیستون و همچنین جایی برای وزنه های تعادل میل لنگ، دامنه و یا قسمت پایین پیستون تراش داده می شود. قطر پیستون های موتور خودرو بین ۷۶-۱۲۲ mm (۳-۴ in) تغییر می کند. که این قطر و وزن در موتور های دیزل ممکن است تفاوت داشته باشد. لازم به ذکر است که همه پیستون ها باید هم وزن باشند تا موتور دچار لرزش نشود.

شکاف افقی پیستون ها در زیر رینگ ها می باشد و به عنوان سد حرارتی ، از هدایت گرمای قسمت رینگ ها به بدنه پیستون که دارای حداقل بازی نسبت به سیلندر است، جلوگیری کند. پیستون های شکاف دار T شکل، دارای دو شیار افقی و عمودی هستند که شکاف افقی آنها نزدیک سر پیستون در زیر رینگ ها، و شکاف عمودی آنها در قسمت راهنمای پیستون قرار دارد. در طرف مقابل، فقط یک شکاف افقی ایجاد می شود. شیار عمودی ضمن ایجاد حالت ارتجاعی در بدنه پیستون در موقع انبساط قسمت راهنمای پیستون را محافظت می کند. شیار در مقابل انبساط زیاد عکس العمل نشان داده، بر بدنه پیستون، در قسمتی که محور های گژن پین قرار دارد، بار زیادی وارد نمی شود. بیشترین نیرو به دامنه فعال پیستون که در سطوح عمود بر تکیه گاه گژن پین است وارد می شود. اندازه شکاف عمودی پیستون، نشان دهنده مقدار ارتجاعی بودن آن است. حالت ارتجاعی بیش از اندازه پیستون باعث لرزش و تکان زیاد پیستون در سیلندر می شود و نیز آن را از حالت اصلی خود خارج می کند. در چنین حالتی نشتی گاز از کناره های پیستون، افزایش یافته و روغن سوزی موتور زیاد تر می شود. اگر شیار روی پیستون کاملا عمود باشد ، در سیلندر خط ایجاد می شود، و در دیواره برآمدگی به وجود می آید ؛ لذا شیار را کمی مایل می سازند.

جنس پیستون ها از چدن یا آلومینیوم می باشد که پیستون های چدنی بدنه ای بزرگ تر و سنگین تر دارند و از آن ها در بعضی از خودرو های دیزلی پرقدرت استفاده می شود. در این نوع پیستون ها، ممکن است اتاق احتراق روی سر پیستون باشد. امروزه در خودرو های سواری و حتی موتور های دیزلی، از پیستون های آلومینیومی، به دلیل سبکی و انتقال حرارت بهتر استفاده می گردد، که به دو روش ریخته گری یا آهنگری ساخته می شوند. گرچه امروزه پیستون های آلومینیومی ریختگی رواج بیشتری دارند اما نوع آهنگری آن برای موتور های سنگین و پر قدرت استفاده می شود. پیستون ریختگی متخلخل است و برای دوران بیش از ۵۰۰۰ PRM مقاوم نیست. در حالی که پیستون ساخته شده به وسیله آهنگری بدنه ای فشرده و متراکم دارد و حدود ۷۰٪ مقاوم تر از نوع ریختگی آن است. این نوع پیستون ها، انتقال حرارت بهتری دارند. از معایب پیستون های آلومینیومی، انبساط زیاد بدنه ی آن است که طراحان مجبور می شوند برای جلوگیری از گریپاژ، پیستون را با لقی زیاد بسازند، مگر آن که با طرح هایی این انبساط را کاهش دهند. با اضافه کردن درصدی سیلیکون به آلومینیم (حدود ۱۶٪) مقدار انبساط حرارتی به

نحو چشم گیری کاهش می یابد. بنابراین پیستون با لقی کمتری ساخته می شود. در مواقعی در راستای گژن پین قطر پیستون را کمتر در نظر می گیرند تا پیستون در حالت سرد کمی متمایل به بیضی شود تا این که در دماهای بالا پیستون حالت گرد به خود بگیرد. از طرف دیگر، پیستون سیلیکون دار ترد و شکننده اند و هنگام پرس کردن گژن پین خطر شکستن پیستون وجود دارد. قسمت سر پیستون که محل قرار گرفتن رینگ های آن است کاملاً دایره ای شکل است و در معرض حرارت بیشتری قرار دارد. به همین منظور قطر آن را حدود ۰,۷ mm – ۰,۵ کوچک تر از قطر دامنه ی پیستون طراحی می کنند[۷] .

۳- نتایج

در جدول (۱) مشخصات بدنه، خواص و نوع شبکه بندی پیستون (مش بندی) نشان داده شده است.

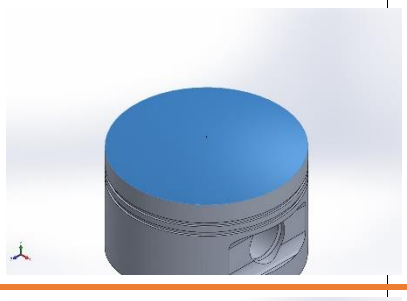
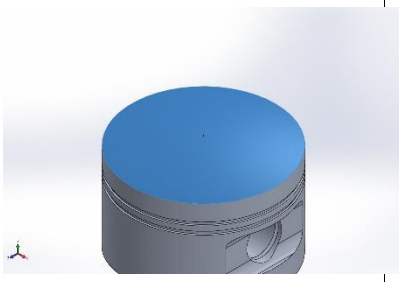
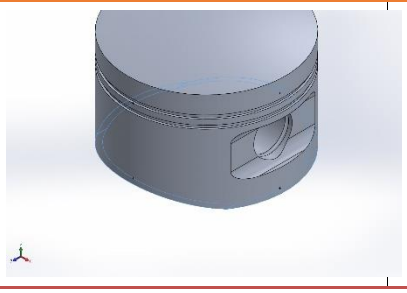
جدول (۱): مشخصات کلی پیستون مدلسازی شده

پیستون		
Solid body	وزن:	۴,۴۸۸۵۱ N
	چگالی:	۲۷۰۰ kg/m^۳
	حجم:	۰,۰۰۰۱۶۹۶۳۴ m^۳
	جرم:	۰,۴۵۸۰۱۱ kg
	قطر:	۹۰ mm
	ارتفاع دامنه:	۴۰ mm
material	نام مواد:	۱۰۶۰ Alloy
	نوع مدل:	Linear Elastic Isotropic
	ضریب حرارتی:	۲۰۰ W/(m.K)
	گرمای ویژه:	۹۰۰ J/(kg.K)
	جرم چگالی:	۲۷۰۰ kg/m^۳
Mesh	سایز المان:	۲,۷۶۸۵۶ mm
	تلرانس:	۰,۱۳۸۴۲۸ mm
	کیفیت مش:	High
	تعداد کل گره ها:	۹۶۷۵۰
	تعداد کل المان ها:	۶۳۳۶۳

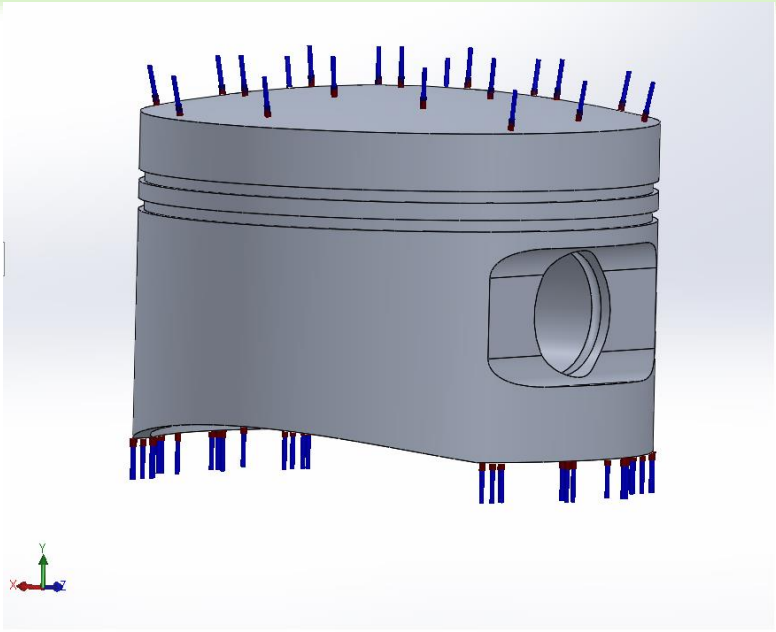
ماهنامه رهیافتی در مدیریت نفت و گاز
دوره ۱، شماره ۲ (پیاپی:۲)، تیر ۱۳۹۹
صفحات ۳۰-۲۳

در جدول (۲) شار حرارتی عبوری تاج پیستون نشان داده شده است و همانطور که ملاحظه می گردد دمای پیستون که از داغ ترین قسمت های موتور بوده، تغییرات دمایی بیشتری نسبت به سیلندر دارد; لذا خستگی حرارتی بیشتری در آن ایجاد می شود.

جدول (۲): مشخصات حرارتی پیستون مدلسازی شده

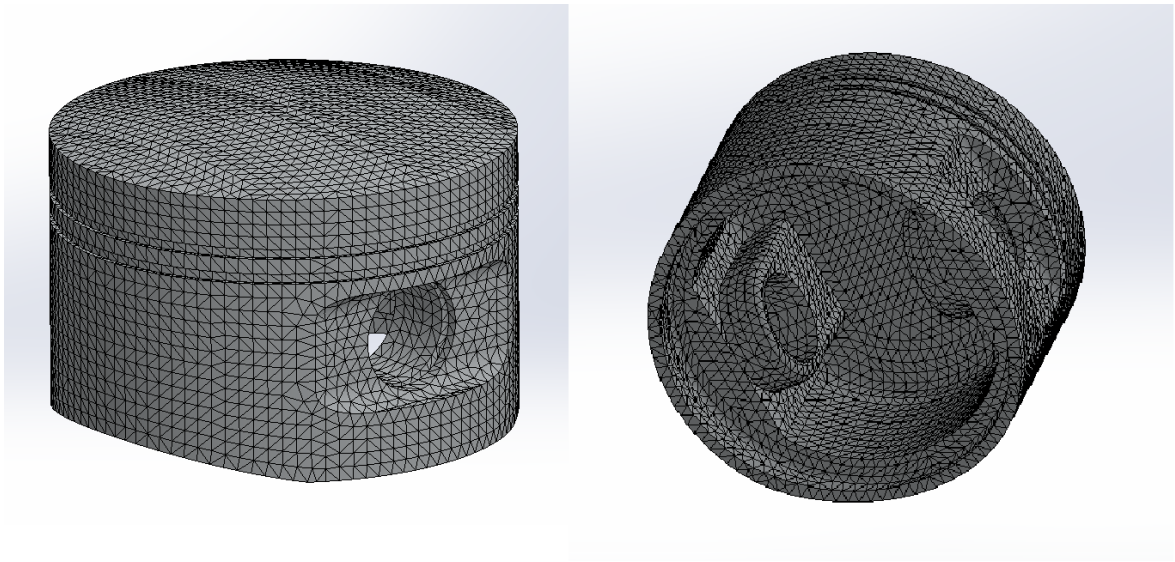
Load name	Load Image	Load Details
Temperature-۱		**Entities:** ۱ face(s) **Temperature:** ٤٤٠ Kelvin
Heat Power-۱		**Entities:** ۱ face(s) **Heat Power Value:** ٤٤٠ W
Temperature-۲		**Entities:** ٤ face(s) **Temperature:** ٤٠٠ Kelvin

ماهنامه رهیافتی در مدیریت نفت و گاز
دوره ۱، شماره ۲ (پیاپی:۲)، تیر ۱۳۹۹
صفحات ۳۰-۲۳



شکل ۱ – حالت بارگذاری دما بر روی کف و قسمت پایینی دامنه پیستون

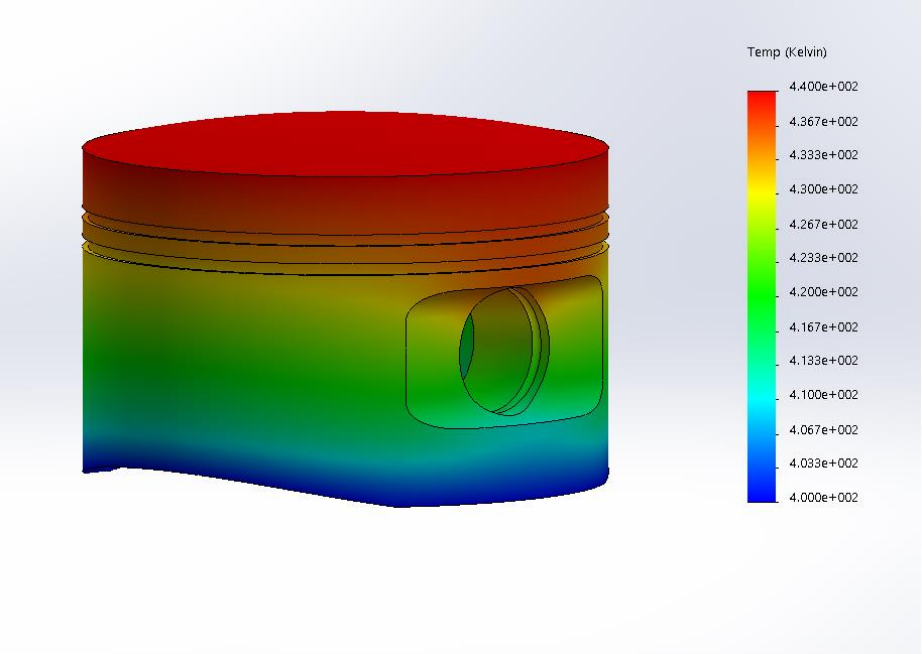
همانطور که در شکل (۱) مشاهده می شود نحوه بار گذاری بر روی تاج و دامنه پیستون بصورت بارگذاری گسترده اعمال گردیده است. نکته مهم دیگری که می توان اشاره نمود آن است که، نیروی وارده از طرف سیلندر اگرچه نسبت به نیروی های دیگر کوچک تر است، اما باعث ایجاد تنش زیادی در دامنه پیستون می گردد. این موضوع زمانی شدیدتر می شود که در اثر سایش، لقی مابین پیستون و لاینر بیشتر شده و باعث افزایش حرکت ثانویه پیستون می شود که موجب افزایش میزان بارهای تناوبی در ناحیه مشخص شده می گردد.



شکل ۲ – حالت شبکه بندی شده (مش بندی) پیستون

برای جلوگیری از ایجاد خطای حرکت جسم صلب در نرم افزار سالیدورک باید پیستون مقید شود. همانگونه که در شکل (۲) ملاحظه می گردد، در انتخاب گره هایی که باید مقید شوند به دو عامل مهم باید توجه داشت; اول اینکه این گره ها باید تا حد

امکان از محل اعمال بارهای مکانیکی فاصله داشته باشد. دوم اینکه این گره ها باید در نقاطی انتخاب شوند که تغییر مکان آنها در حالت واقعی مسئله کم ترین باشد.



شکل ۳ – نمای حرارتی پس از تحلیل پیستون مدلسازی شده

در شکل (۳) نمای حرارتی تحلیل پیستون یک موتور بنزینی مشاهده می شود که دما بصورت یکنواخت از کف گنبدی شکل پیستون تا کف دامنه پایینی امتداد پیدا کرده است. همچنین در این شکل بطور شماتیک تنش های ناشی از تغییر شکل های حرارتی در تاج پیستون مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است. در زمان انجام احتراق و داغ شدن پیستون، در اثر وجود گرادیان دما و انبساط پیستون، تنش های فشاری در تاج پیستون بوجود می آیند و همچنین در زمان سرد شدن پیستون نیز (به ویژه در مرحله مکش) ناحیه تاج در برابر تنش های کششی قرار می گیرند.

۴- نتیجه گیری

در این پژوهش بر روی تحلیل پیستون تحقیق انجام گرفته است. نتایج حاصل از این تحقیق را می توان به صورت زیر خلاصه کرد:

۱- روش تحلیل حرارتی با استفاده از سیمولیشن حرارتی نرم افزار سالیدورک، روشی ساده و مناسب برای تحلیل حرارتی اجزای مختلف موتور است.

۲- خنک کاری پیستون از طریق برخورد جت روغن به زیر پیستون، مقدار زیادی از گرمای پیستون را انتقال میدهد.

۳- در روش تحلیل حرارتی با استفاده از سیمولیشن حرارتی نرم افزار سالیدورک هر چه تعداد گره ها بیشتر باشد دقت محاسبات بالاتر بوده و همچنین زمان حل افزایش می یابد.

۴- تنش های حرارتی در ناحیه دامن پیستون که گرادیان دما کمتر است، کمترین مقدار را دارند. همچنین در ناحیه تاج پیستون و رینگ ها که گرادیان دما شدیدتر است، بیشترین میزان تنش رخ می دهد.

۵- برای تعیین تنش های حرارتی هیچ قیدی بر پیستون اعمال نشد، اما بازهم دیده می شود که میزان تنش های حرارتی نیز قابل توجه است، این تنش ها فقط ناشی از توزیع غیر یکنواخت دما در پیستون هستند. این موضوع اهمیت تنش های حرارتی و ضرورت تحلیل حرارتی دقیق پیستون برای طراحی بهینه تر را نشان می دهد.

مراجع

[۱] مرادی رضا، آبیاری بیدگلی اسدالله: مولد خودروهای سواری. چاپ اول. شرکت چاپ و نشر کتاب های درسی ایران، تهران ، ص ۱۵۰-۱۴۹، ۱۳۹۵.

[۲] Silva. F.S., “Fatigue on Engine Pistons–A Compendium of Case Studies”, Journal of Engineering Failure Analysis, No, ۱۳, pp. ٤٨٠– ٤٩٢, ٢٠٠٦.

[۳] M.Valdes, J. Casanova and A. Rovira, “Design of Carbon Pistons Using Transient Heat Transfer and Stress Analyses”, SAE Paper, No. ۰۱-۳۲۱۷, ۲۰۰۱.

[٤] Mohammadi. A., Yaghoubi. M. and Rashidi. M., “Analysis of Local Convective Heat Transfer in a Spark Ignition Engine”, Journal of Engineering Failure Analysis, No. ۱۳, pp. ٤٨٠–٤٩٢, ٢٠٠٦.

[٥] Hywood. J. B., “Internal Combustion Engine Fundamentals”, Mc Grow-Hill, New York, ۱۹۸۸.

[٦] http://hyunda.ir/car-technicality/engine/motive-parts/piston.html

[۷] http://www.denama.ir