

مطالعه تأثیر شرایط مرزی حرارتی گازهای داخل محفظه احتراق و مجاری آب خنک کاری بر توزیع دمای بستار موتور دیزل سنگین

حمیدرضا چمنی*

رئیس گروه تحلیل، شرکت تولیدی و صنعتی دیزل سنگین ایران (دسا)
h.chamani@gmail.com

دکتر ایرج ستاری فر

استادیار دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر
sattarifar@aut.ac.ir

دکتر محمد محمدی اقدم

دانشیار دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر
aghdam@aut.ac.ir

* نویسنده مسئول/تاریخ دریافت: ۸۸/۳/۸ پذیرش نهایی مقاله: ۸۸/۹/۱

چکیده

بستار یکی از قطعات اصلی موتور دیزل می باشد که در معرض بارگذاری های مختلف حرارتی و مکانیکی قرار دارد. یکی از اهداف در طراحی بستار، طراحی با دوام و حصول عمر طولانی خستگی می باشد. مهمترین بارگذاری از دیدگاه تخمین عمر بستار، بارگذاری حرارتی می باشد که تأثیر عمده ای بر تخمین عمر بستار دارد، چرا که منجر به ایجاد تنش های حرارتی و خستگی کم چرخه در بستار می گردد. بنابراین، مطالعه تأثیر شرایط مرزی حرارتی بر توزیع دمای بستار کمک شایانی را به طراحان بستار خواهد نمود و می توان گفت امری ضروری برای طراحی بستار می باشد. در این مقاله، به بررسی اثرات تغییر شرایط مرزی حرارتی ناشی از گازهای احتراق و مجاری خنک کاری در شرایط کارکرد متفاوت موتور بر توزیع دمای بستار موتور دیزل سنگین از جنس های چدن خاکستری و چدن نشکن پرداخته شده است. همچنین، تأثیر دیگر شرایط مرزی حرارتی بر توزیع دمای بستار در نقاط بحرانی آن مطالعه شده است.

مختلف بستار دقیق تر خواهد بود. شایان ذکر است که گرادیان حرارتی و نیز مقید نمودن انبساط حرارتی سازه در اثر افزایش دما منجر به ایجاد تنش های حرارتی در بستار می گردد.

به منظور پرهیز از رخداد اثرات خزشی و آرامش تنش در دماهای گرم، بسته به جنس بستار، بر اساس تجارب قبلی طراحان موتور و آزمایش های خزشی و خستگی حرارتی-مکانیکی ماده بستار، یک دمای بیشینه برای بستار تعریف می گردد که در هنگام طراحی بستار به عنوان یکی از الزامات طراحی لحاظ می شود. در نتیجه، دمای بیشینه بستار یکی از اهداف در

کلیدواژه ها: بستار موتور دیزل سنگین، تحلیل حرارتی، شرایط مرزی حرارتی

۱- مقدمه

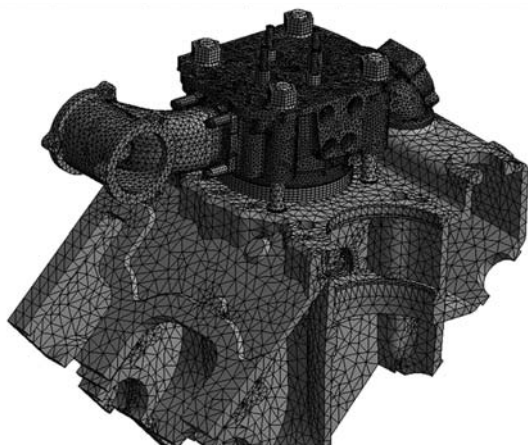
تنش های حرارتی در بستار، تنش های غالب و حاکم می باشند که منجر به ایجاد خستگی کم چرخه و همچنین سبب ایجاد تنش های میانگین در خستگی پرچرخه بستار می شوند [۱]. بنابراین، می توان گفت بارگذاری حرارتی مهمترین بارگذاری از منظر تخمین عمر بستار می باشد و هر چه توزیع دما در بستار دقیق تر باشد، تنش های حرارتی حاصله از آن در نقاط

۲- تحلیل حرارتی بستر

الگوی اجزاء محدود تحلیل حرارتی بستر شامل تمامی قطعاتی است که در تماس با بستر می‌باشند و بر توزیع دمای آن مؤثرند. همچنین، همان‌طور که در قسمت بعدی به طور کامل توضیح داده خواهد شد، تحلیل حرارتی مجموعه بستر با تحلیل دینامیک سیالات سه بعدی جریان آب در مجاری خنک‌کاری بستر به‌طور غیر مستقیم پیوند دارد و دمای دیواره در تحلیل سیالاتی از نتایج تحلیل حرارتی مجموعه بستر بدست می‌آید. شایان ذکر است، در صورتی که در الگوی تحلیل حرارتی مجموعه بستر، یکی از مرزها (دیواره) در تحلیل سیالاتی وجود نداشته باشد، در فرایند نگاشت توزیع دما از نتایج تحلیل حرارتی به مرزها در تحلیل سیالاتی، آن مرز به صورت بی‌دررو فرض می‌شود، لذا کلیه قطعاتی که در تماس با سیال خنک‌کاری می‌باشند در تحلیل حرارتی باید شبیه‌سازی شوند. در نتیجه، قطعاتی شامل قسمتی از بدنه موتور که در ناحیه زیرین بستر قرار دارد، پیچ‌های بستر، قسمت بالایی آستری، حلقه دوده زدا، حلقه (فولادی) لایه بستر، دریچه‌های دود و هوا، نشیمنگاه‌ها و راهنماهای دریچه‌های دود و هوا در الگو لحاظ شده است.

نواحی که در تحلیل حرارتی مجموعه بستر دارای شبکه‌بندی ریز می‌باشد:

- ۱- نواحی با گرادیان دمایی شدید
 - ۲- سطوحی که در تماس با یکدیگر می‌باشند.
 - ۳- سطوحی که دارای فصل مشترک با تحلیل سیالاتی می‌باشند.
- در شکل‌های (۱) و (۲) به ترتیب شبکه‌بندی مجموعه بستر موتورهای شماره ۱ و ۲ برای تحلیل حرارتی نشان داده شده است.



شکل ۱ شبکه‌بندی مجموعه بستر برای تحلیل حرارتی-موتور ۱

طراحی بستر می‌باشد به طوری که دمای بستر خصوصاً در ناحیه سطح شعله باید کمتر از حد مجاز باشد.

در مرحله طراحی مفهومی موتور، دانش تأثیر شرایط مرزی حرارتی بر توزیع دمای بستر کمک شایانی را در طراحی بستر می‌نماید، چرا که تنش‌های حرارتی و عمر خستگی کم‌چرخه بستر عمدتاً ناشی از توزیع دما و دمای بیشینه بستر می‌باشد. در این مقاله با در اختیار داشتن اطلاعات پایه برای تحلیل حرارتی بستر، تحلیل حرارتی بستر انجام شده و تأثیر هر یک از شرایط مرزی حرارتی بر توزیع دما و گرادیان دمایی در بستر بحث شده است.

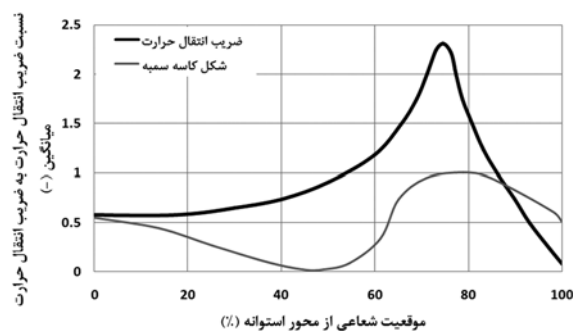
هر چه دمای سطح شعله و گرادیان دمایی در نقاط مختلف بستر کمتر باشد، تنش‌های حرارتی در آن کمتر خواهد بود و لذا عمر خستگی کم‌چرخه بستر (که عمدتاً تحت تأثیر خستگی حرارتی قرار دارد) افزایش خواهد یافت. بنابراین در مرحله طراحی مفهومی بستر، تنها با داشتن توزیع دمای بستر، می‌توان طراحی اولیه آن را انجام داد. سپس با تحلیل‌های سازه‌ای، توزیع تنش‌های حرارتی-مکانیکی بستر بدست می‌آید و می‌توان دوام آن را ارزیابی نمود.

در این مطالعه، تحلیل حرارتی بستر موتور دیزل سنگین ملی ۸۷د که از جنس چدن نشکن می‌باشد و بستر موتور دیزل سنگین شرکت رستون که از جنس چدن خاکستری می‌باشد انجام شده است و پاسخ حرارتی هر یک در اثر تغییرات شرایط مرزی بررسی شده است. در جدول (۱) مشخصات عمومی هر دو موتور دیزل سنگین یاد شده ارائه شده است. همچنین، به منظور استقلال بخشیدن نتایج از هندسه بستر، یک بستر نمونه با هندسه ساده نیز تحلیل حرارتی شده است و تأثیر تغییرات شرایط مرزی بر توزیع دمای بستر مطالعه شده است.

جدول ۱ مشخصات عمومی موتورهای دیزل سنگین ۱ و ۲

مشخصات	واحد	موتور ۱	موتور ۲
قطر استوانه	mm	۱۵۰	۲۱۵
طول پیمایش سمبه	mm	۱۸۰	۲۷۵
تعداد استوانه	-	۱۲	۱۶
توان نامی	kW	۱۱۵۰	۳۱۶۰
دور موتور	rpm	۱۸۰۰	۱۰۰۰
فشار مؤثر میانگین	bar	۳۴	۲۱
جنس بستر	-	چدن نشکن	چدن خاکستری

[۳] در تحقیقات تجربی خود بر روی چندین موتور دیزل سنگین مشاهده نمودند که، با فرض توزیع ثابت دما در جهت شعاعی در داخل استوانه، توزیع ضریب انتقال حرارت جابجایی بر روی تاج سمبه به صورت تابعی از موقعیت شعاعی می‌باشد. در شکل (۳) توزیع ضریب انتقال حرارت نسبت به ضریب انتقال حرارت میانگین بر حسب موقعیت شعاعی برای سمبه و همچنین شکل تاج سمبه نشان داده شده است. در سمبه‌هایی که تاج آن‌ها گسترده می‌باشد و اصطلاحاً هسلمن نامیده می‌شوند، توزیع ضریب انتقال حرارت گازهای داخل استوانه با بستار به نحوی است که بیشترین مقدار آن متعلق به مکانی است که دارای بیشترین گودی در نقطه متناظر آن در تاج سمبه می‌باشد [۴]. موتورهایی که در این مقاله به آنها پرداخته شده است، دارای تاج سمبه به شکل هسلمن^۲ می‌باشند.



شکل ۳ توزیع ضریب انتقال حرارت نسبت به ضریب انتقال حرارت میانگین بر حسب موقعیت شعاعی برای سمبه [۳]

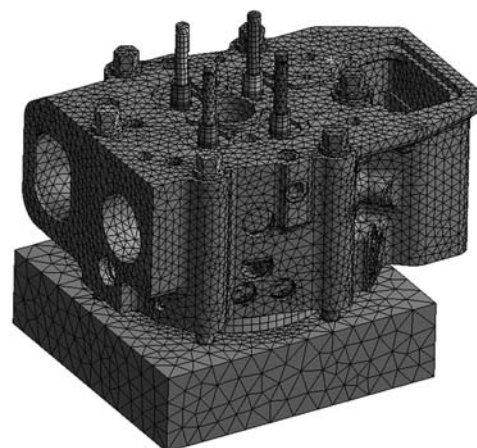
برای محاسبه ضریب انتقال حرارت گازهای خروجی در راهگاه دود و گازهای ورودی در راهگاه هوا از معادله هیرس^۳ استفاده شده است [۵]

$$h = \frac{K}{D(0.158 Re^{0.8})} \quad (1)$$

که در معادله (۱) عدد رینولدز به صورت (۲) محاسبه می‌گردد:

$$Re = \frac{4\dot{m}}{\pi\mu D} \quad (2)$$

برای محاسبه ضریب انتقال حرارت جابجایی در مجاری خنک‌کاری بستار از تحلیل دینامیک سیالات محاسباتی جریان استفاده شده است. روند تحلیل حرارتی و جزئیات کامل آن در مرجع [۶] به طور کامل توضیح داده شده است. به دلیل محدودیت‌هایی که در طراحی مجاری خنک‌کاری آب بستار وجود دارد، نواحی از جریان آب وجود دارد که با سرعت کند سیال و از سطوح گرم بستار عبور می‌کنند. در این نواحی ضریب انتقال حرارت جابجایی آب کوچک می‌باشد لذا دمای دیواره بستار افزایش



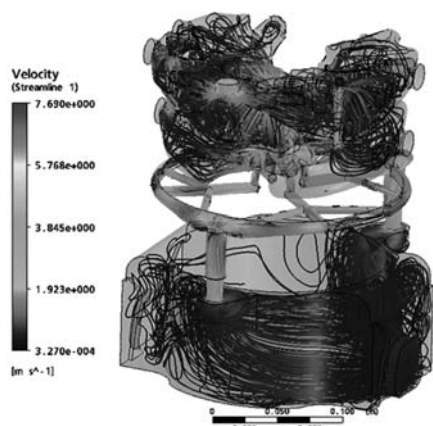
شکل ۲ شبکه‌بندی مجموعه بستار برای تحلیل حرارتی-موتور ۲

بارگذاری‌های حرارتی بستار عمدتاً عبارتند از:

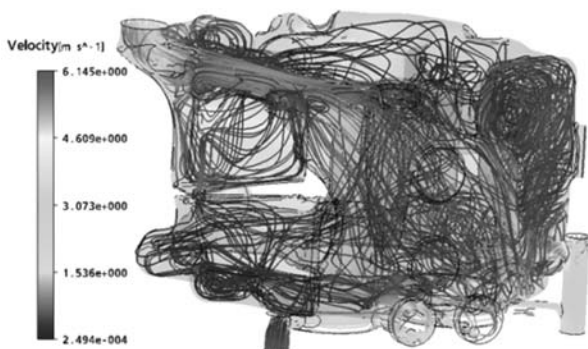
- ۱- انتقال حرارت گازهای حاصل از احتراق با سطح شعله بستار
- ۲- انتقال حرارت گازهای خروجی و ورودی با راهگاه‌های دود و هوا و همچنین با دریچه‌های دود و هوا
- ۳- انتقال حرارت در اثر تماس دریچه‌ها با نشیمنگاه دریچه‌ها و همچنین تماس نشیمنگاه دریچه‌ها با بستار
- ۴- خنک‌کاری بستار از طریق مجاری آب خنک‌کاری بستار
- ۵- انتقال حرارت جابجایی آزاد سطوح خارجی بستار با هوای اطراف آن
- ۶- انتقال حرارت گازهای خروجی در چند راهه دود و انتقال حرارت در اثر تماس چند راهه دود با بستار
- ۷- انتقال حرارت در اثر تماس لایه زیر افشانه سوخت با بستار
- ۸- انتقال حرارت در اثر تماس راهنمای دریچه دود با بستار
- ۹- انتقال حرارت در اثر تماس حلقه اتصال بستار با بستار

شرایط مرزی حرارتی گازهای داخل محفظه و گازهای خروجی در راهگاه دود با استفاده از تحلیل یک بعدی عملکرد موتور با استفاده از نرم‌افزار GT-Power که با استفاده از نتیجه آزمون موتور صحه‌گذاری شده است [۲] و همچنین نرم افزار Technoperf، که شرکت تکنومات^۱ توسعه داده است و با استفاده از نتایج آزمون‌های عملی بر روی چندین موتور دیزل سنگین صحه‌گذاری شده است، محاسبه گردیده و به عنوان شرایط مرزی حرارتی اعمال شده است. از تحلیل‌های فوق، دمای متوسط و همچنین ضریب انتقال حرارت متوسط گازهای داخل استوانه محاسبه می‌شوند. برای تحلیل حرارتی بستار، توزیع انتقال حرارت موضعی گازهای احتراق بر روی سطح شعله بستار مورد نیاز می‌باشد. حسن و همکارانش

برای تحلیل دینامیک سیالات سه‌بعدی مجاری خنک‌کاری بستار از نرم‌افزار تجاری ANSYS CFX-11.0 و برای تحلیل حرارتی مجموعه بستار از نرم‌افزار تجاری ANSYS Workbench-11.0 استفاده شده است. در شکل‌های (۴) و (۵) به ترتیب خطوط جریان در مجاری خنک‌کاری بستار موتور ۱ و ۲ نمایش داده شده است که بیانگر الگوی جریان سیال خنک‌کار در داخل مجاری خنک‌کاری بستار و همچنین توزیع سرعت جریان می‌باشند. در نواحی که سرعت جریان آب بیشتر است، ضریب انتقال حرارت جابجایی بیشتر خواهد بود. شکل (۶) توزیع ضریب انتقال حرارت جابجایی مؤثر (شامل ضریب انتقال حرارت جابجایی اجباری و جوشش جریان آب) را در مجاری خنک‌کاری بستار برای موتور ۱، که در نرم‌افزار ANSYS برای تحلیل حرارتی بر روی شبکه‌بندی اجزاء محدود نگاشت شده است، نمایش می‌دهد.



شکل ۴ خطوط جریان در مجاری خنک‌کاری بستار-موتور ۱



شکل ۵ خطوط جریان در مجاری خنک‌کاری بستار-موتور ۲

می‌یابد و منجر به جوشش آب می‌گردد. جوشش آب سبب افزایش ضریب انتقال حرارت و باعث کنترل دمای دیواره در نزدیکی نقطه جوشش آب در فشار جریان آب می‌گردد [۶]. لذا برای بررسی دقیق انتقال حرارت آب خنک‌کاری با دیواره بستار، پدیده جوشش آب مورد بررسی شود و در محاسبات ضریب انتقال حرارت لحاظ گردد. جعفرآبادی و همکارانش [۷] روش سریعی برای تحلیل مزدوج دینامیک سیالات محاسباتی و تحلیل حرارتی ارائه دادند که در آن اثرات جوشش جریان سیال خنک‌کار موتور نیز در نظر گرفته می‌شود. در روش فوق، انتقال حرارت در اثر جوشش آب با استفاده از روش عزیزمت حباب [۸] محاسبه می‌گردد. در این مقاله، از روش یاد شده برای تحلیل مزدوج دینامیک سیالات سه بعدی مجاری خنک‌کاری بستار و تحلیل حرارتی مجموعه بستار استفاده شده است. در آن روش، شار حرارتی به صورت ترکیبی از شار حرارتی ناشی از انتقال حرارت جابجایی اجباری q_{fc} و جوشش جریان q_{nb} در نظر گرفته می‌شود.

$$q_w = q_{fc} + q_{nb} \quad (3)$$

بر طبق معادله پیشنهادی چن [۹]، شار حرارتی کل برای حباب در لحظه جدا شدن از سطح گرم، در حالت جوشش هسته‌ای، می‌توان به صورت معادله (۴) بیان نمود:

$$q_w = \phi h_{fc} (T_w - T_{Bulk}) + S h_{nb} (T_w - T_s) \quad (4)$$

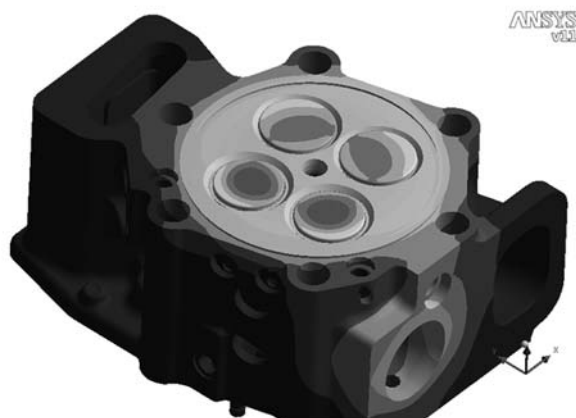
که در آن θ و S ضرایب اصلاح می‌باشند. h_{fc} ضریب انتقال حرارت جابجایی اجباری می‌باشد که از تحلیل دینامیک سیالات سه بعدی جریان محاسبه می‌شود و با ضریب θ اصلاح می‌گردد. h_{nb} ضریب انتقال حرارت جوشش، T_w دمای دیواره، T_s دمای بخار اشباع در فشار جریان سیال و T_{bulk} دمای حجمی سیال است. بر طبق معادله زوبر [۱۰] ضریب انتقال حرارت جوشش جریان در حالت جوشش هسته‌ای برابر است با:

$$h_{nb} = 0.00122 \frac{k_l^{0.79} c_{p,l}^{0.45} \rho_l^{0.49}}{\sigma^{0.5} \mu_l^{0.29} h_{lg}^{0.24} \rho_g^{0.24}} (T_w - T_s)^{0.25} \Delta P_s^{0.75} \quad (5)$$

استینر [۸] روش عزیزمت حباب را برای محاسبه ضریب اصلاح S پیشنهاد داده است که در آن مراحل مختلف تشکیل حباب، رشد آن، لغزش حباب بر روی سطح و در نهایت جدا شدن حباب از سطح شبیه‌سازی می‌شود. در آن الگو اثرات حرکت حباب بر انتقال حرارت با استفاده از ضریب اصلاح S_{flow} لحاظ شده است. تأثیر جریان مادون سرد نیز با استفاده از ضریب اصلاح S_{sub} لحاظ می‌گردد.

$$S = S_{flow} \cdot S_{sub} \quad (6)$$

$$q_w = q_{fc} + q_{nb} S_{flow} S_{sub}$$



شکل ۷ توزیع دمای بستار موتور ۲

در شکل‌های (۷) و (۸) به ترتیب توزیع دما در مجموعه بستار برای موتور ۱ و ۲ نشان داده شده است. نتایج حاکی از آن است که دمای بیشینه بستار در محل پل بین دریچه‌ها رخ می‌دهد. در موتور ۱ نشیمنگاه دریچه‌ها دارای مسیر آبگرد نمی‌باشد ولی در موتور ۲ نشیمنگاه دریچه‌های دود به وسیله مسیر آبگرد خنک‌کاری می‌شود لذا دمای پل بین دریچه‌های دود-دود در موتور ۲ کمتر از دریچه‌های هوا-هوا می‌باشد. مقدار دمای بیشینه بدست آمده از تحلیل حرارتی در محل پل بین دریچه‌ها برای موتور ۲، منطبق بر نتایج آزمون تجربی اندازه‌گیری دمای بستار می‌باشد [۱۴].

۳- مطالعه فراسنجی (پارامتری) شرایط مرزی حرارتی بستار

یکی از واماندگی‌های رایج در بستارهای موتورهای دیزل، ترک‌خوردگی در نواحی پل بین دریچه‌ها و نواحی بین محل سوراخ افشانه سوخت و دریچه‌ها می‌باشد که در اثر خستگی کم‌چرخه حرارتی ایجاد می‌گردد. هر چه دمای بستار در آن نواحی خنک‌تر باشد و گرادیان دمایی یکنواخت‌تر باشد، تنش‌های حرارتی کمتر خواهد بود و در نتیجه عمر خستگی بستار افزایش می‌یابد. در این بخش، تأثیر شرایط مرزی حرارتی بر دمای نواحی بحرانی بستار بحث و بررسی شده است. شایان ذکر است، هدف از این مطالعه، شناخت بارگذاری‌های حرارتی مؤثر بستار و همچنین بررسی میزان حساسیت دمای محل پل بین دریچه‌ها در اثر تغییرات بارگذاری‌های حرارتی می‌باشد.

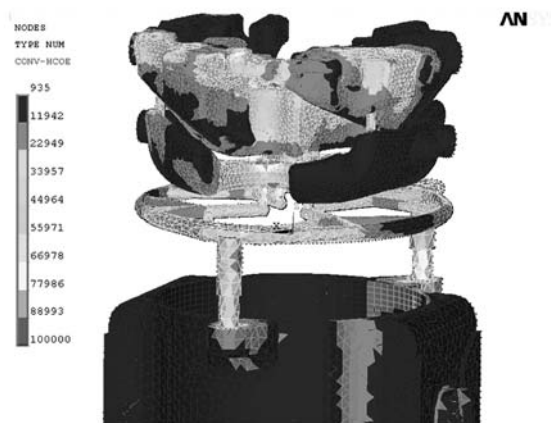
۱-۳- موتور ۱- بستار از جنس چدن نشکن

در موتور ۱ خنک‌کاری سطح شعله بستار عمدتاً از طریق مجاری خنک‌کاری می‌باشد که در نزدیکی سطح شعله بستار سوراخکاری شده‌اند. این مجاری به شکل متقاطع در اطراف دریچه‌ها سوراخکاری شده‌اند به

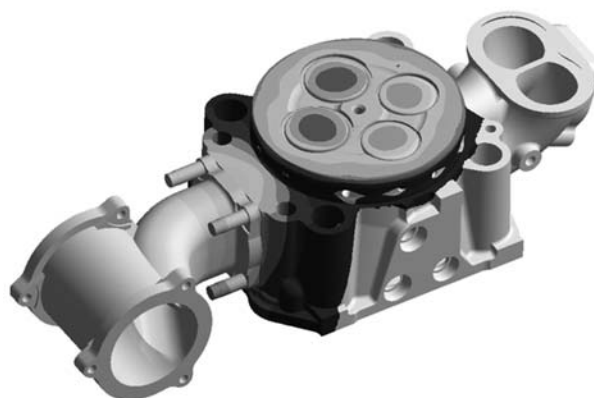
برای محاسبه انتقال حرارت در سطوح تماسی، از جمله سطوح تماسی بین نشیمنگاه دریچه‌ها و بستار، لایه بستار و آستری و غیره، از معادله تجربی ساویجا [۱۱] و گرف [۱۲] استفاده شده است:

$$h = 10.4606 \frac{K\rho}{P} \left(\frac{P}{B}\right)^{1.115} \quad (7)$$

که در آن h ضریب انتقال حرارت هدایت در سطوح تماسی $K \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ ضریب هدایت حرارتی مواد در تماس با یکدیگر $\rho \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$ چگالی معادل مواد در تماس با یکدیگر، P فشار تماس B و (MPa) سختی برینل مواد در تماس با یکدیگر (BHN) می‌باشد. در سطح تماس بین دریچه و نشیمنگاه آن، مقادیر محاسبه شده از معادله (۷) با مقادیر اندازه‌گیری شده در مرجع [۱۳] مقایسه شده است که نتایج نزدیک به یکدیگر می‌باشند و گواه بر صحت معادله (۷) می‌باشد.



شکل ۵ توزیع ضریب انتقال حرارت جابجایی مؤثر در مجاری خنک‌کاری بستار برای موتور ۱



شکل ۶ توزیع دمای بستار موتور ۱

۳-۲- موتور ۲- بستار از جنس چدن خاکستری

ضریب هدایت حرارتی در چدن خاکستری در حدود ۳۰٪ بیشتر از چدن نشکن می‌باشد لذا دمای بیشینه در شرایط مرزی حرارتی یکسان، برای بستار از جنس چدن خاکستری کمتر از بستار از جنس چدن نشکن است.

در شکل‌های (۱۰) و (۱۱) تأثیر دمای میانگین و ضریب انتقال حرارت میانگین گازهای حاصل از احتراق بر دمای سقف بستار در محل پل بین دریچه‌ها نشان داده شده است. تأثیر افزایش دمای گاز بر دمای سقف بستار به ازای هر واحد افزایش دمای میانگین گازهای احتراق، تقریباً دو برابر تأثیر افزایش ضریب انتقال حرارت گازهای احتراق می‌باشد.

در شکل (۱۲) میزان تأثیر ضریب انتقال حرارت آب خنک‌کاری در مجاری خنک‌کاری بستار بر دمای پل بین دریچه‌های دود-دود و هوا-هوا نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌گردد، تقریباً پس از $HTC=4000(W/m^2C)$ تأثیر ضریب انتقال حرارت آب بر کاهش دمای سقف بستار اندک می‌باشد. لذا طراحی مدار خنک‌کاری باید به گونه‌ای انجام شود که حداقل ضریب انتقال حرارت در مجاری خنک‌کاری بستار در حدود $5000(W/m^2C)$ باشد. به عنوان مثال، نتایج تحلیل دینامیک سیالات سه‌بعدی حاکی از آن است که طراحی راهگاه‌های آب در این بستار به گونه‌ای صورت گرفته است که در مجاری آب خنک‌کاری در پشت سقف بستار مقدار ضریب انتقال حرارت حداقل برابر با $HTC=4000(W/m^2C)$ می‌باشد.

در بستار شماره ۲ برای خنک‌کاری نشیمنگاه دریچه‌ها به کمک سیال خنک‌کار موتور، از یک شیوه دیگر استفاده شده است. در این بستار، نشیمنگاه دریچه‌های دود-دود به کمک مسیر آبگرد که در پشت آن طراحی شده است خنک‌کاری می‌شود (به عبارت دیگر مجاری خنک‌کاری در سقف بستار همانند بستار شماره ۱ سوراخکاری نشده است). در شکل (۱۳) توزیع دمای بستار موتور ۲ در مقطعی که از محل پل بین دریچه‌های دود-دود و هوا-هوا می‌گذرد، نمایش داده شده است. لذا در این نوع طراحی بستار، تغییر میزان ضریب انتقال حرارت آب خنک‌کاری در مجاری خنک‌کاری به طور مستقیم بر دمای پل بین دریچه‌ها تأثیر گذار نمی‌باشد و تأثیر آن اندک است.

در شکل (۱۴) اثر ضریب انتقال حرارت آب خنک‌کاری در مسیر آبگرد در داخل نشیمنگاه دریچه دود بر دمای پل بین دریچه‌های دود-دود و هوا-هوا نشان داده شده است.

در شکل (۱۵) اثر ضریب انتقال حرارت تماس بین لوله مسی افشانه سوخت با بستار بر دمای پل بین دریچه‌ها نشان داده شده است. همان‌طور

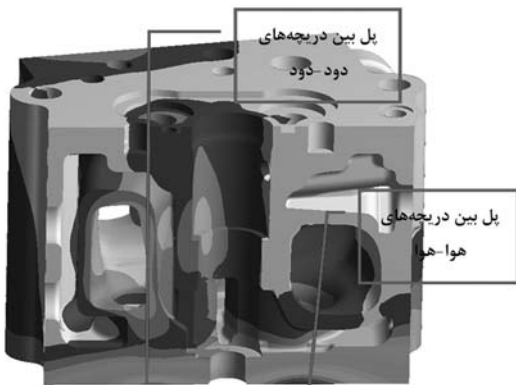
گونه‌ای که دریچه‌ها را تقریباً احاطه نموده‌اند. همان‌طور که در شکل (۴) مشاهده می‌گردد، جریان آب پس از خنک کردن اطراف آستری، وارد مجاری سوراخکاری در نزدیکی سقف بستار می‌شود و دمای سقف بستار را کاهش می‌دهد.

در شکل (۹) درصد تغییرات دمای پل بین دریچه‌های دود-دود و هوا-هوا در اثر درصد تغییرات دمای میانگین و ضریب انتقال حرارت میانگین گازهای حاصل از احتراق نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل ملاحظه می‌شود، میزان تأثیر دمای میانگین گازهای داخل محفظه بر دمای بستار زیاد و کاملاً محسوس می‌باشد. ضریب تأثیر تغییرات دمای میانگین گازهای داخل محفظه نسبت به ضریب انتقال حرارت میانگین گازهای داخل محفظه بر دمای پل بین دریچه‌ها برای این بستار در حدود ۱٫۸۵ می‌باشد. در ضمیمه این مقاله، محاسبات ساده انتقال حرارت بین گازهای محفظه احتراق و بستار انجام شده است و دمای دیواره بستار در سمت گاز بدست آمده است. بر طبق معادله (۸) مؤثرترین شرط مرزی حرارتی بر دمای سطح شعله بستار، دمای میانگین گازهای داخل محفظه است که نتایج تحلیل فراسنجی نیز گواه بر این مطلب می‌باشد.

یکی از معیارها در طراحی بستار موتور، حداکثر دما در محل‌های پل‌های بین دریچه‌ها می‌باشد. در مرحله طراحی مفهومی موتور، حالات مختلفی برای شرایط گازهای داخل محفظه می‌تواند محتمل باشد که با استفاده از تحلیل عملکردی (ترمودینامیکی) موتور بدست می‌آیند. با علم به این موضوع که تأثیر دمای گازهای داخل محفظه موتور تقریباً ۱٫۸۵ برابر اثر ضریب انتقال حرارت گازهای داخل محفظه می‌باشد، می‌توان شرایط مناسب سوخت و هوارسانی موتور را به گونه‌ای طراحی و تعیین نمود که معیارهای دمایی بستار نیز لحاظ گردند.

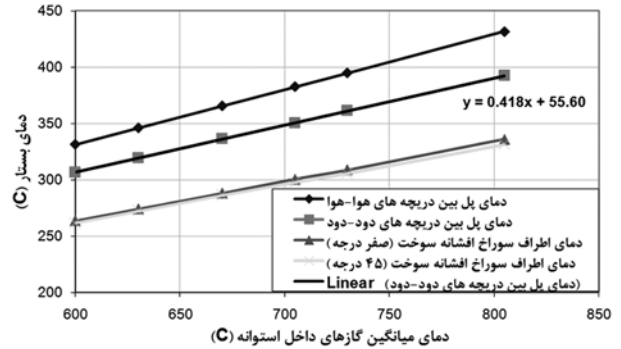


شکل ۹ اثر دمای میانگین و ضریب انتقال حرارت میانگین گازهای حاصل از احتراق بر دمای پل بین دریچه‌های دود-دود و هوا-هوا

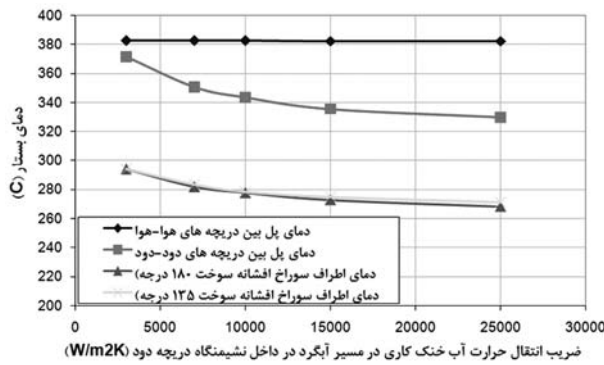


شکل ۱۳ توزیع دمای بستار موتور ۲ در مقطعی که از محل پل بین دریچه‌های دود-دود و هوا-هوا می‌گذرد

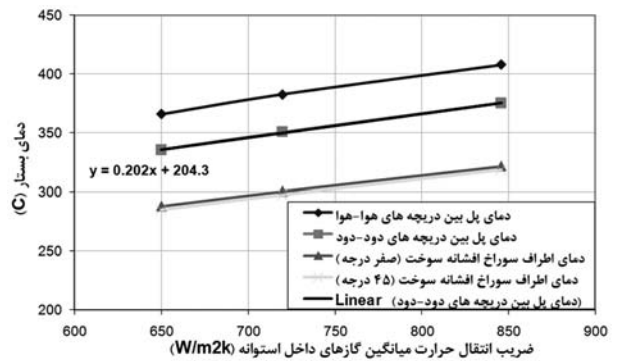
که مشاهده می‌شود اثر مقدار ضریب انتقال حرارت به صورت موضعی می‌باشد و تنها بر گرادیان حرارتی از سوراخ افشانه سوخت تا پل بین دریچه‌ها تأثیرگذار است.



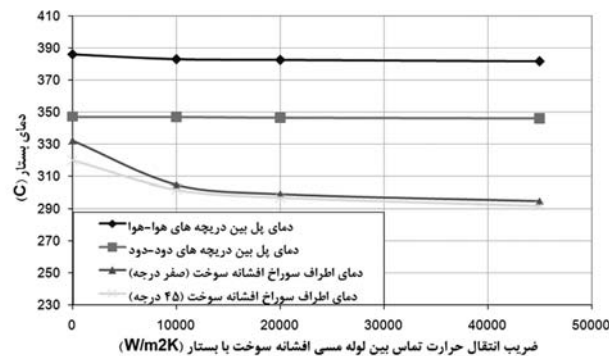
شکل ۱۰ اثر دمای متوسط گازهای حاصل از احتراق بر دمای پل بین دریچه‌های دود-دود و هوا-هوا



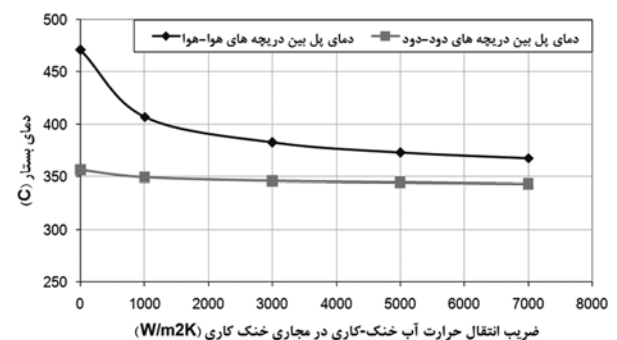
شکل ۱۴ اثر ضریب انتقال حرارت آب خنک‌کاری در مسیر آبگرد در داخل نشیمنگاه دریچه دود بر دمای پل بین دریچه‌های دود-دود و هوا-هوا



شکل ۱۱ اثر ضریب انتقال حرارت متوسط گازهای حاصل از احتراق بر دمای پل بین دریچه‌های دود-دود و هوا-هوا



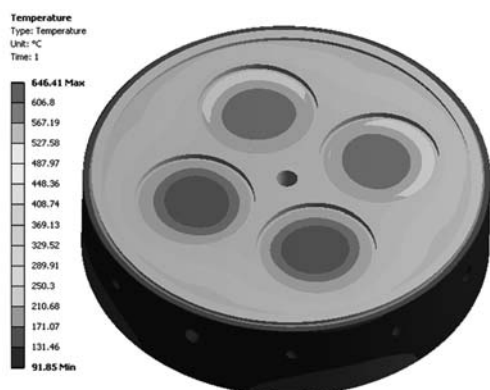
شکل ۱۵ اثر ضریب انتقال حرارت تماس بین لوله مسی افشانه سوخت با بستار بر دمای پل بین دریچه‌های دود-دود و هوا-هوا



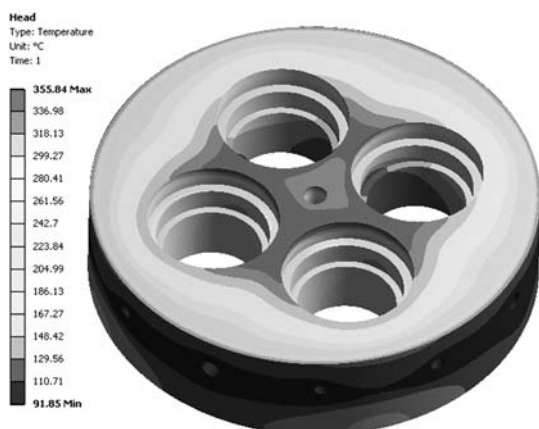
شکل ۱۲ اثر ضریب انتقال حرارت آب خنک‌کاری در مجاری بر دمای پل بین دریچه‌های دود-دود و هوا-هوا

۳-۳- تحلیل حرارتی بستار با هندسه ساده

به منظور استقلال بخشیدن نتایج از هندسه بستار، یک بستار نمونه با هندسه ساده نیز تحلیل حرارتی شده است. هدف از آن تحلیل، بررسی توزیع دمای بستار با استفاده از اطلاعات پایه که در مرحله طراحی مفهومی موتور مشخص می‌گردند و مطالعه پاسخ حرارتی بستار در اثر تغییرات شرایط مرزی حرارتی می‌باشد. بدین منظور، تنها عرشه شعله بستار، نشیمنگاه دریچه‌ها، قسمت کلاهی شکل دریچه‌ها، حلقه اتصال (لایه بستار) و قسمتی از آستری شبیه‌سازی شده است. در شکل (۱۶) شبکه‌بندی مجموعه بستار نشان داده شده است. از عناصر مرتبه دو حرارتی (۹۰ Solid و ۸۷ Solid) برای شبکه‌بندی استفاده شده است. طول عناصر در این بستار (همانند بستارهای قبلی) ۴ میلی‌متر می‌باشد. شبکه‌بندی بستار با عناصر به طول ۲ و ۸ میلی‌متر نیز انجام شده است. تفاوت دما در سطح شعله بستار برای شبکه‌بندی‌های فوق در حدود ۱ درجه سانتیگراد می‌باشد لذا شبکه‌بندی استفاده شده از دقت کافی برخوردار است. جنس بستار و بدنه موتور چدن نشکن و جنس آستری چدن خاکستری می‌باشد. در شکل‌های (۱۷) و (۱۸) به ترتیب توزیع دمای مجموعه بستار و بستار نمایش داده شده است.

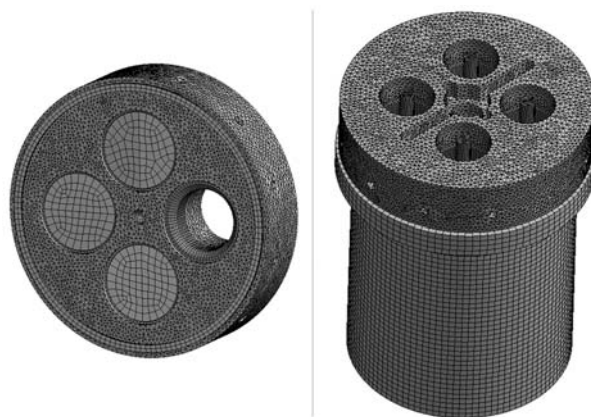


شکل ۱۷ توزیع دمای مجموعه بستار- جنس چدن نشکن

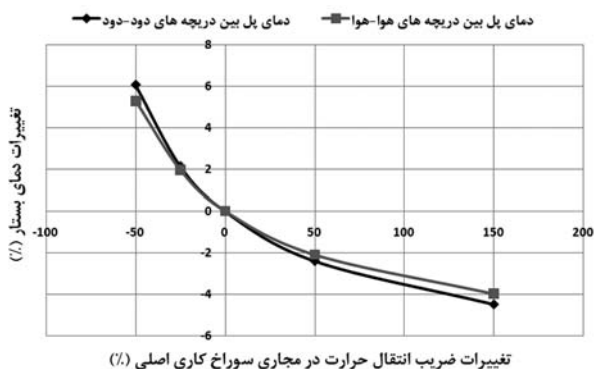


شکل ۱۸ توزیع دمای بستار- جنس چدن نشکن

در شکل‌های (۱۹) و (۲۰) به ترتیب اثر دمای میانگین و ضریب انتقال حرارت میانگین گازهای حاصل از احتراق بر دمای پل بین دریچه‌های دود-دود و هوا-هوا برای بستارهای از جنس چدن نشکن و چدن خاکستری نشان داده شده است. تفاوت چندان در نمودارهای (۱۹) و (۲۰) مشاهده نمی‌گردد. نسبت تأثیر تغییرات دمای میانگین به ضریب انتقال حرارت میانگین گازهای داخل محفظه بر دمای پل بین دریچه‌ها برای بستار از جنس چدن نشکن در حدود ۱,۹ و برای جنس چدن خاکستری در حدود ۱,۸ می‌باشد.



شکل ۱۶ شبکه‌بندی مجموعه بستار- الگوی ساده شده



شکل ۲۱ اثر ضریب انتقال حرارت در مجاری سوراخ کاری خنک کاری سقف بستر بر دمای پل بین دریچه‌های دود-دود و هوا-هوا



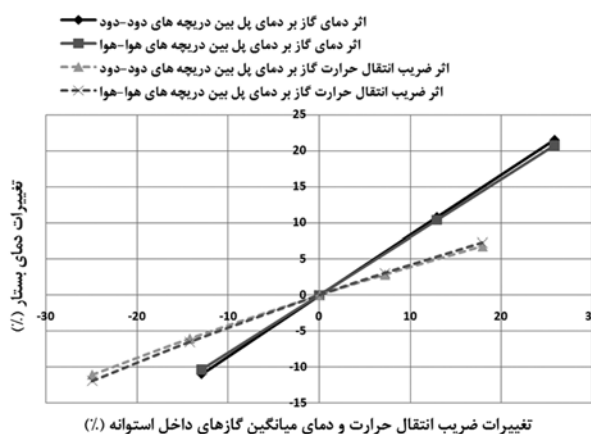
شکل ۲۲ اثر فاصله مجاری سوراخ کاری خنک کاری سقف بستر تا سطح شعله بستر بر دمای پل بین دریچه‌های دود-دود و هوا-هوا

همان‌طور که در شکل (۲۳) ملاحظه می‌گردد، اثر ضریب انتقال حرارت در سطح تماس بین نشیمنگاه دریچه با بستر بر توزیع دمای بستر ناچیز می‌باشد.

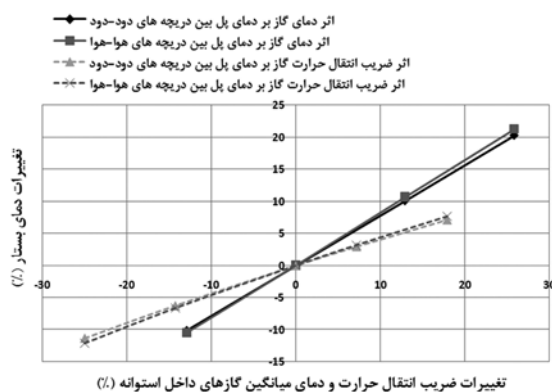


شکل ۲۳ اثر ضریب انتقال حرارت در سطح تماس بین نشیمنگاه دریچه با بستر بر دمای پل بین دریچه‌های دود-دود و هوا-هوا

در بستارهایی که خنک کاری سقف بستر به کمک مجاری سوراخ کاری شده در سقف بستر صورت می‌پذیرد، تأثیر ضریب انتقال حرارت در مجاری خنک کاری بر توزیع دمای نواحی پل بین دریچه‌ها اندک است.



شکل ۱۹ اثر دمای میانگین و ضریب انتقال حرارت میانگین گازهای حاصل از احتراق بر دمای پل بین دریچه‌های دود-دود و هوا-هوا (موتور ۱)



شکل ۲۰ اثر دمای میانگین و ضریب انتقال حرارت میانگین گازهای حاصل از احتراق بر دمای پل بین دریچه‌های دود-دود و هوا-هوا (موتور ۲)

در شکل‌های (۲۱) و (۲۲) به ترتیب اثر ضریب انتقال حرارت در مجاری سوراخ کاری خنک کاری سقف بستر و فاصله مجاری سوراخ کاری خنک کاری سقف بستر تا سطح شعله بستر بر دمای پل بین دریچه‌های دود-دود و هوا-هوا نشان داده شده است. خنک کاری سقف بستر به کمک سوراخکاری در سقف بستر یکی از روش‌های بسیار مؤثر در خنک کاری سطح شعله می‌باشد. هر چه مقدار فاصله مجاری سوراخ کاری شده با سطح شعله کمتر باشد، دمای بیشینه در سطح شعله کمتر خواهد بود. شایان ذکر است که در مجاری سوراخ کاری شده در سقف بستر، جوشش جریان آب رخ می‌دهد و این امر کمک شایانی به کاهش دمای سقف بستر می‌کند. به عنوان یک خط راهنما برای تحلیل حرارتی مقدماتی بستر، می‌توان گفت جوشش جریان آب سبب می‌شود که دمای بستر در مجاری سوراخکاری سقف بستر، نزدیک به دمای جوشش آب در فشار کاری جریان آب و در حدود ۵ الی ۱۵ درجه بیشتر از دمای جوشش آب باشد.

تأثیر ضریب انتقال حرارت در تماس بین لایه افشانه سوخت و بستر تنها به صورت موضعی می‌باشد و بر توزیع دما در نواحی اطراف سوراخ افشانه سوخت تأثیرگذار می‌باشد.

۶- نمادها

سختی برینل مواد	B
قطر هیدرولیکی	D
ضریب انتقال حرارت	h
ضریب هدایت حرارتی	K
فشار تماس	P
شار حرارتی	q
عدد رینولدز	Re
دما	T
چگالی معادل مواد	ρ
ضرایب اصلاح	$\theta, S, S_{flow}, S_{Sub}$

۴- کاربرد

یکی از معیارها در طراحی بستر موتور، حداکثر دما در محل‌های پل‌های بین دریچه‌ها می‌باشد. در مرحله طراحی مفهومی موتور، حالات مختلفی برای شرایط گازه‌های داخل محفظه می‌تواند محتمل باشد که با استفاده از تحلیل عملکردی (ترمودینامیکی) موتور بدست می‌آیند. با استفاده از تحلیل‌های حرارتی صورت گرفته بر روی الگوهای هندسی ساده، می‌توان تابع هدف برای دمای بستر را تشکیل داد که شامل متغیرهای دمای میانگین و ضریب انتقال حرارت میانگین گازه‌های داخل محفظه احتراق می‌باشد. با استفاده از تابع فوق، به راحتی می‌توان شرایط گازه‌های داخل محفظه احتراق را بهینه‌سازی نمود.

۷- زیر نویس‌ها

ویژگی حجمی سیال	$bulk$
جابجایی اجباری	fc
حالت مایع	l
حالت گاز	g
جوشش هسته ای	nb
حالت (بخار) اشباع	s
دیواره	W

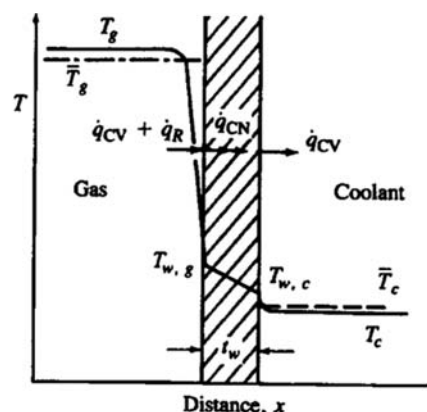
۵- نتیجه گیری

تأثیر شرایط مرزی حرارتی بر توزیع دما و گرادیان حرارتی بستر موتور دیزل سنگین از جنس چدن خاکستری و نشکن مورد بحث قرار گرفت. همچنین میزان اختلاف توزیع دمای بستر در تحلیل حرارتی با استفاده از فرضیات ساده محاسباتی با حل‌های دقیق مزدوج حرارتی-سیالاتی بستر بررسی گردید. با استفاده از محاسبات شرایط مرزی با در نظر گرفتن اثرات جوشش جریان آب در مجاری خنک‌کاری، می‌توان به نتایج قابل قبولی برای طراحی مفهومی بستر دست یافت. تأثیر افزایش دمای گاز بر دمای سقف بستر به ازای هر واحد افزایش دمای متوسط گازه‌های احتراق، تقریباً دو برابر تأثیر افزایش ضریب انتقال حرارت گازه‌های احتراق می‌باشد. مهمترین شرط مرزی حرارتی از دیدگاه دمای پل بین دریچه‌ها در بستر، دمای میانگین گازه‌های داخل استوانه است.

۸- ضمیمه

- 4- Chamani, H.R. and Drinkwater, S., "Milestone 2 Detailed Cylinder Head Analysis", D87 technical documents, DESA. Co, 2007.
- 5- Shojaefard, M.H., Ghaffarpour, M.R., Noorpoor A.R. and Alizadehnia, S., "Thermomechanical Analysis of an Engine Cylinder Head", IMechE 220 Part D: J. Automobile Engineering, (2006).
- 6- Chamani, H.R. and Jafarabadi, M., "Thermal Analysis of a Heavy Duty Diesel Engine Cylinder Head", Proceedings of the 6th International Conference on Internal Combustion Engines, ICICE-6-1240, 2009: Tehran, Iran.
- 7- Jafarabadi, M., Chamani, H.R., Malakizadi, A. and Jazayeri, S.A., "A fast coupled CFD-thermal analysis of a heavy duty diesel engine water cooling system", Proceedings of IMECE2008, ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, 2008: Boston, USA.
- 8- Steiner, H., Kobor, A. and Gebhard, L., "A Wall Heat Transfer Model for Subcooled Boiling Flow", International Journal of Heat and Mass Transfer 48, (2005): 4161-4173.
- 9- Chen, J.C., "A Correlation for Boiling Heat Transfer to Saturated Fluids in Convective Flow", ASME preprint 63 HT34 presented at the 6th National Heat Transfer Conference, 1963: Boston.
- 10- Forster, H.K. and Zuber, N., "Dynamics of Vapor Bubbles and Boiling Heat Transfer", AIChE J. 1, (1955): 531-535.
- 11- Savija, I., Culham, J. R., Yovanovich, M. M. and Marotta, E. E., "Review of Thermal Conductance Models for Joints Incorporating Enhancement Materials", journal of thermophysics and heat transfer, 17, No. 1, (2003): 43-52.
- 12- Graff, W.J. , "Thermal Conductance across Metal Joints", Machine Design, 1960, pages 166-172.
- 13- Wisniewski, T. S. and Furmanski, P., "Thermal Contact Conductance of Valve Face/Seat Interface in IC Engine", Thermal Conductivity 24, Thermal Expansion 12, Edited by P.S. Gaal, Taylor & Francis Routledge, 1997.
- 14- Jackson, P. E, Pugh, W. J and Poulson, R. J., "Ruston RK215 series engines", CIMAC, Proceedings of the 19th International Congress on Combustion Engines, 1991: Florence, IT.
- 15- Heywood, J.B., "Internal combustion engine fundamentals", McGraw-Hill, 1988.

با استفاده از الگوی ساده شکل (۲۴) می‌توان انتقال حرارت بین گازهای محفظه احتراق و بستار را به منظور بدست آوردن دید کلی شبیه‌سازی نمود. در شکل (۲۴) به صورت ساده شده، انتقال حرارت بین گازهای داخل محفظه احتراق، بستار و مجاری آب خنک‌کاری بستار نمایش داده شده است.



شکل ۲۴ انتقال حرارت بین گازهای محفظه احتراق و بستار [۱۵]

در صورتی که عبارات انتقال حرارت تشعشع و جابجایی تلفیق شده و به صورت معادل، با عبارت انتقال حرارت جابجایی نمایش داده شوند می‌توان معادله (۸) را برای دمای دیواره بستار در سمت گاز نوشت:

$$T_{w,g} = \bar{T}_g - \frac{\bar{T}_g - \bar{T}_c}{1 + h_g \left(\frac{1}{h_c} + \frac{x}{k} \right)} \quad (8)$$

بنابر معادله (۸)، مؤثرترین شرط مرزی حرارتی در تعیین دمای سطح شعله بستار، دمای میانگین گازهای داخل محفظه T_g می‌باشد.

Reference:

- 1- Malakizadi, A., Chamani, H.R., Shahangian, S.N. and Jazayeri, S.A., Sattarifar, I., "Thermo-Mechanical Fatigue Life Prediction of a Heavy Duty Diesel Engine Liner", ASME Internal Combustion Engine Division 2007 Fall Technical Conference, 2007, ICEF2007-1775.
- 2- Keshavarz, M., "Performance analysis of RK215 engine", D87 technical documents, DESA. Co, 2008.
- 3- Hansen, A., Rasmussen, M. and Sarsten, A., "Thermal loading of diesel engine components and its prediction", CIMAC, Proceedings of the 9th International Congress on Combustion Engines, Diesel Engines, 1971: Stockholm, SE.

Study of Effects of Combustion Gases and Cooling Thermal Boundary Conditions on Temperature Distribution of a Heavy Duty Diesel Engine Cylinder Head

H.R Chamani*

Head of Analysis Team, D87 project
Iran Heavy Diesel Engine Mfg. Co
H.chamani@gmail.com

I. Sattarifar

Assistant Professor
Department of Mechanical Engineering
Amirkabir University of Technology
SattariFar@aut.ac.ir

M. Mohammadi Aghdam

Associate Professor
Department of Mechanical Engineering
Amirkabir University of Technology
aghdam@aut.ac.ir

*Corresponding Authors
Received: May. 29, 2009
Accepted in Revised Form: Nov. 22, 2009

Abstract

Cylinder head is one of the critical components of diesel engine that is subject to different thermal and mechanical loadings. One of the cylinder head design targets is durability and high fatigue life of this part. Thermal loading is the major loading of cylinder head in term of fatigue life assessment because leads to thermal stress and low cycle fatigue. Therefore, the study of the effect of thermal boundary conditions on the temperature distribution of cylinder head will assist cylinder head designer and is necessary part of cylinder head design. In this study, the effects of thermal boundary conditions, due to combustion gases and cooling gallery, at different engine operating conditions on the temperature distribution of a heavy duty diesel engine cylinder head are investigated. Also, the influences of other thermal boundary conditions on the temperature distribution of cylinder head at the critical regions are studied.

Keywords: Diesel Engine Cylinder Head, Thermal Analysis, Thermal Boundary Conditions