



بررسی تأثیر پوشش‌های نانومتری بر اتلاف اصطکاکی و سایش در حلقه سنبه

مهدی کاوند^{۱*}، علی اکبر تبریزی^۲، امید فروتن^۳

^۱ مرکز علمی کاربردی گروه صنعتی ایران خودرو، تهران، ایران، m.kavand@ikco.ir

^۲ شرکت ایران خودرو، تهران، ایران، a.tabrizi@ikco.ir

^۳ شرکت تحقیق، طراحی و تولید موتور ایران خودرو، تهران، ایران، o.foroutan@ikco.ir

* نویسنده مسئول

اطلاعات مقاله

چکیده

تاریخچه مقاله:

دریافت: ۲۰ بهمن ۱۳۹۷

پذیرش: ۱۷ فروردین ۱۳۹۸

کلیدواژه‌ها:

حلقه و سنبه

پوشش نانو

اتلاف اصطکاکی

مقاومت سایشی

آب بندی مکانیکی محفظه احتراق در موتورهای درونسوز توسط رینگ پیستون انجام می‌گیرد که باید علاوه بر خاصیت آب بندی دارای مقاومت سایشی مناسب باشد و برای دسترسی به این خاصیت از پوشش آلیاژی بر روی رینگ استفاده می‌شود. در حال حاضر پوشش‌های CrN برای پوشش دهی رینگ پیستون به کار می‌رود که مقاومت سایشی خوبی در دمای اتاق دارد ولی به خاطر ساختار متخلخل شونده سایش بسیار زیادی در دماهای بالای ۲۰۰ درجه از خود نشان می‌دهد و فاقد خاصیت خود روان کننده است. اگرچه رفتار سایشی پوشش‌های متنوع اعمالی بر روی رینگ‌های پیستون توسط محققان زیادی مورد بررسی قرار گرفته است، ولی به منظور مقایسه و بررسی کلی پوشش‌ها تحقیقات اندکی انجام شده است. هدف این پروژه، تحلیل پوشش‌های جدید نانو کوتینگ برای رینگ پیستون موتور TU5 می‌باشد. در ابتدا تأثیر پوشش‌های مختلف به روش نانو کوتینگ بر روی رفتار سایشی رینگ پیستون مورد مطالعه قرار گرفته است و سپس با استفاده از نرم افزار AVL معادلات مدل روانکاری هیدرودینامیک رینگ پیستون با سیلندر شبیه سازی و حل عددی شده و تأثیر پوشش‌های مختلف رینگ پیستون بر پارامترهایی از قبیل اتلاف اصطکاکی، سایش، میزان بلوایی و ضخامت فیلم روغن مورد بررسی قرار می‌گیرد. با توجه به نتایج حاصله و نمودارهای شبیه سازی، پوشش دهی نترات کروم آلومینم آلیاژ شده با رنیوم به روش نانو کوتینگ و آلیاژ سازی، تأثیر ۳۰ درصدی بر کاهش اتلاف اصطکاکی و کاهش ۸۳ درصدی سایش و بهبود ۷۹ درصدی خاصیت آب بندی رینگ دارد.



تمامی حقوق برای انجمن علمی موتور ایران محفوظ است.

مقدمه

یکی از بزرگ‌ترین عوامل ایجاد اتلاف‌ها اصطکاک‌های در موتورهای احتراق داخلی تماس حلقه سنبه با بوش استوانه است تقریباً ۱۱ تا ۲۵ درصد از کل اتلاف‌ها مکانیکی را به خود اختصاص داده است. اتلاف‌ها مکانیکی به طور کلی ۴ تا ۱۵ درصد اتلاف انرژی در موتورهای احتراق داخلی را تشکیل می‌دهد. اگر بتوانیم این اتلاف‌ها را تا ۱۰ درصد کاهش دهیم بازده مصرف سوخت ۱،۵ تا ۲،۵ درصد کاهش می‌یابد. اتلاف‌ها اصطکاک‌های بین حلقه سنبه و بوش استوانه چندین دهه است که مورد توجه بسیار زیادی قرار دارد و در سال‌های اخیر مقالات متعددی در این مورد نگاشته شده است.

بهینه‌سازی صافی سطح و بافت‌ها شوری سطح استوانه‌ها که توسط دستگاه هون ایجاد می‌شود جهت کاهش اصطکاک و بطور موازی با آن کاهش روغن سوزی، کاهش سایش و کاهش آلاینده‌ها از موارد بسیار مهم در طراحی موتورهای احتراق داخلی می‌باشد. کاهش اصطکاک بین حلقه و بوش باعث کاهش بارهای حرارتی بر روی سیستم خنک‌کاری و حرارت عمومی موتور و در نتیجه رسیدن به توان بیشتر در موتورهای احتراق داخلی می‌شود. در طراحی‌های مدرن امروزی کاهش اصطکاک از چالش‌های بسیار مهم و تعیین‌کننده در توسعه موتورهای احتراق داخلی می‌باشد [۱]. در سال‌های اخیر مطالعات متعددی در این مورد انجام شده است که در ادامه به برخی از آنها اشاره خواهیم داشت.

حلقه سنبه‌های مدرن با قطرهای بزرگ‌تر از بوش استوانه در سال ۱۸۵۱ توسط رادی [۲] اختراع گردید که از یک نیروی الاستیکی برای آب‌بندی فشار استفاده می‌کرد و به زودی به عنوان استاندارد برای طراحی حلقه و سنبه استفاده شد و تا اوایل قرن بیستم مورد استفاده قرار گرفت.

طراحی حلقه و سنبه در قرن بیستم بر بهبود مواد و طراحی متمرکز گردید تا بتواند فشارهای بالاتر و حرارت‌های بیشتر را تحمل کرده و دوام بیشتری داشته باشد. مطالعات علمی در مورد حلقه و سنبه از سال ۱۹۳۰ شروع شد، زمانی که مهندسی در پی بهبود کارایی عملکرد حلقه و سنبه بودند.

تینگ، تحقیق در مورد روغن‌کاری هیدرودینامیک بین حلقه و بوش استوانه و بهینه‌سازی پارامترهای اولیه حلقه سنبه آغاز گردید [۳].

بعدها در نیمه دوم قرن بیستم عملکرد بین حلقه و بوش برای کنترل آلاینده‌های موتور و کاهش مصرف روغن مورد توجه قرار گرفت. این تحقیقات منجر به رسیدن مهندسی از ابعاد قطری با تراز سبهای بالا به طراحی صافی سطح میکرونی بوش استوانه گردید.

اولین محاسبات بر روی روانکاری حلقه سنبه و بوش لاینر توسط کستلمن [۴] انجام شد. ایلپون و ساندرز [۵] محاسبات اثر ضخامت فیلم روغن بر روی نیروهای شعاعی را انجام دادند. اثرات فشار فیلم

روغن توسط فروهما [۶] آنالیز شد. او مدل‌سازی سطح حلقه را مورد توجه قرار داد که دو کمان دایره‌ای در اتصال با سطح صاف دیواره‌ی بوش لاینر بود. تینگ و مایر [۷] مدل سایش حلقه و بوش را بررسی کردند و مدل هیدرو دینامیک را برای آنالیز حلقه و استوانه مورد استفاده قرار دادند. پاتیر و چن [۸]، همچنین گرینوود و تریپ [۹] برای اثر صافی سطوح معادله‌ی رینولدز را بصورت معادله‌ی میانگین اصلاح کردند که شامل شبیه‌سازی و محاسبه‌ی عددی جریان و پروفایل صافی سطح بود و منجر به تحقیقات بسیار زیادی در این زمینه گردید. روهده و همکارانش [۱۰] از معادله‌ی میانگین رینولدز برای توسعه‌ی یک مدل ریاضی برای بررسی عملکرد اصطکاک در بارهای دینامیکی تماس حلقه و بوش در حالت‌های هیدرو دینامیک و ترکیبی استفاده کردند و دریافتند که اصطکاک حلقه و سنبه به برجسته‌نگاری^۱ سطح وابسته است.

پریست و تیلور [۱۱] دریافتند که طراحی‌های تریبولوژیکی در دوام و عملکرد موتور بسیار تأثیر گذار است. مافی [۱۲] یک مدل تئوری را برای تخمین ضخامت فیلم روغن توسعه داد و پریست [۱۳] ضخامت فیلم روغن را در کل چرخه موتور پیش بینی کرد.

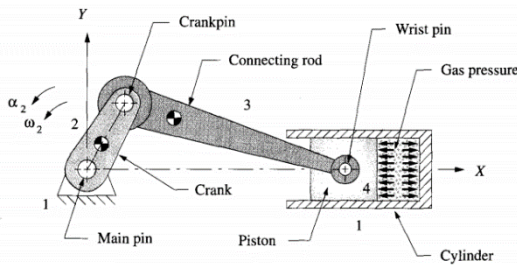
در مطالعه دیگر مک‌گیهان [۱۴] تأکید نموده که اصطکاک مجموعه سنبه می‌تواند تا ۷۵ درصد از کل اصطکاک مکانیکی یک موتور احتراق داخلی را تشکیل دهد. مقالات اخیر نشان می‌دهند که اصطکاک کل ناشی از سنبه‌ها، حلقه‌ها و شاتون‌ها به میزان ۴۰ تا ۵۵ درصد در یک موتور دیزلی یا موتور احتراق جرقه‌ای روی داده است. اختراع اسمیت و همکاران [۱۵] به عملیات پاشش سطح خارجی حلقه با یک پوشش سطح سخت برای ایجاد یک لایه مقاوم در برابر سایش اشاره دارد. پوشش‌هایی که از طریق پاشش اعمال می‌شوند به طور ذاتی دشوار هستند زیرا حلقه‌های سنبه به نحوی پوشش داده می‌شوند که از چسبیدن پوشش به سطوحی غیر از "هدف" مورد نظر، سطح حلقه سنبه‌ی بیرونی جلوگیری شود. اختراع یک روش برای اعمال پوشش و یک تجهیزات شامل یک یا چند عضو، یک سوراخ در جهت مخالف و مشعل پاشش پیشنهاد می‌کند.

در مطالعه‌ی دیگر، فراریس و همکارانش [۱۶] در سال ۲۰۱۰ به مطالعه انواع روش‌های پوشش دهی نوین بر روی حلقه پرداختند. آنها از دید تریبولوژی، به بررسی نحوه عملکرد حلقه بالایی در موتورهای دوگانه سوز پرداختند و به بررسی تأثیر اینکه چگونه مصرف اتانول در موتورهای دوگانه سوز از لحاظ سایش، سایش، خردشدگی و اصطکاک، حلقه بالایی را تحت تأثیر قرار می‌دهد. برای ارزیابی مقاومت در برابر خردشدگی و سایش، آزمایشات دینامومتری بر روی موتور انجام دادند، آزمون‌های مربوط به مقاومت در برابر سایش هم انجام شد و نتایج مربوط به هر کدام از پوشش‌ها در شکل ۱ به عنوان یک نمودار با همدیگر مقایسه شد.

¹ Topography

- سنبه
- حلقه بالایی
- حلقه دوم
- حلقه روغن
- لاینر
- شاتون
- گژن پین

مشخصات عمومی موتور مورد مطالعه



شکل ۲: مجموعه لنگ و لغزنده در موتورهای احتراق داخلی

مشخصات عمومی موتور TU5

موتور TU5 یکی از موتورهای تولیدی شرکت ایران خودرو می باشد که تصویر این موتور در شکل ۳ نشان داده شده است.



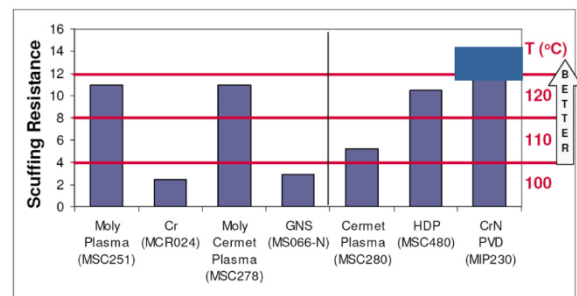
شکل ۳: موتور TU5

جهت تعریف مشخصه های عمومی موتور TU5 که در جدول ۱ نشان داده شده است استفاده شده است.

جدول ۱: مشخصه عمومی موتور TU5

مقدار	مشخصه (واحد)
۷۸٫۵	قطر استوانه (mm)
۸۲	کورس سنبه (mm)
۱۵۸۷	حجم جابجایی (cm ³)
۴۱	شعاع لنگ (mm)
۱۳۳٫۵	طول دسته سنبه (mm)
۰٫۳۰۷۱	نسبت شعاع لنگ به طول دسته سنبه
۱٫۰۴۴	نسبت قطر به کورس
-	فاصله قطرهای استوانه (mm)
۱۱	نسبت تراکم

در این مطالعه، با استفاده از نرم افزار AVL در محیط Piston&Ring در ابتدا مدل یک بعدی مجموعه لنگ و لغزنده موتور TU5 شبیه سازی خواهد شد و سپس به تحلیل استفاده از نانو پوشش های جدید در حلقه سنبه این موتور با هدف کاهش اصطکاک و سایش دیواره بدنه و حفظ خاصیت آب بندی حلقه پرداخته خواهد شد. در همین راستا در ابتدا تأثیر پوشش های مختلف به روش نانو پوشش بر روی رفتار سایشی حلقه سنبه مورد مطالعه قرار گرفته است سپس با حل معادلات مدل روانکاری هیدرودینامیک حلقه سنبه با استوانه در نرم افزار شبیه سازی، تأثیر تغییرات اعمال شده بر روی پوشش حلقه سنبه برای بهبود و بهینه سازی موارد همچون، میزان بخارها روغن، ضخامت فیلم روغن و در نهایت میزان اتلاف اصطکاک مورد بررسی قرار می گیرد.



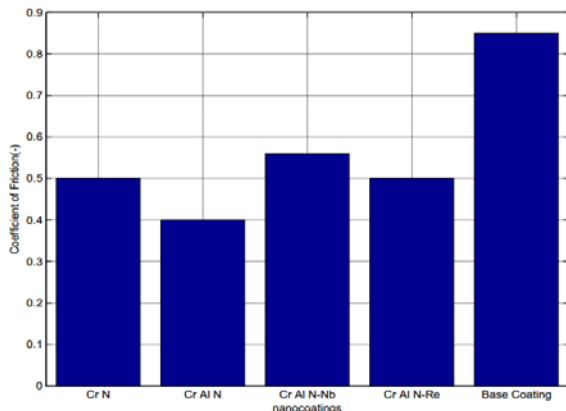
شکل ۱: رتبه بندی سایش پوشش های مختلف حلقه [۱۶]

رویه شبیه سازی یک بعدی سامانه موتور مورد مطالعه

مجموعه لنگ و سنبه یکی از سامانه های اصلی موتورهای احتراق داخلی می باشد که پیچیدگی آن با پیشرفت فناوری در حال افزایش است. برای کمک به مهندسان در ساخت و بهبود چنین سامانه هایی نیاز به استفاده از نرم افزارهای شبیه سازی عملکرد مجموعه حلقه و سنبه می باشد. شبیه سازی دارای برخی مزایا نسبت به آزمون های تجربی می باشد از جمله اینکه با صرف هزینه و زمان کمتر می توان به ارزیابی این سامانه پرداخت، حتی مواردی را که بررسی آنها در آزمایش های واقعی غیرممکن می باشد مطالعه کنند. برای شبیه سازی سامانه لنگ و لغزنده نیازمند داده های مربوط به مشخصات سنبه، مشخصات لنگ، مشخصات حلقه ها، بوش استوانه، شبیه سازی احتراق، شبیه سازی رفتار حرارتی موتور و نوع روغن مصرفی می باشیم. به طور کلی سامانه لنگ و لغزنده موتور را می توان به دو بخش اصلی لاینر و مجموعه سنبه تقسیم بندی کرد. شکل ۲، تصویر مجموعه لنگ و لغزنده موتور احتراق داخلی را نشان می دهد.

برای شبیه سازی مجموعه سنبه و لاینر، با توجه به مدل سه بعدی، نقشه های دوبعدی و رفتار احتراقی موتور مورد مطالعه استفاده می شود، شبیه سازی در محیط نرم افزار Piston&Ring با توجه به قالب های موجود در نرم افزار برای هر یک از اجزا صورت می گیرد. به طور کلی جهت شبیه سازی سامانه مورد مطالعه در این محیط اطلاعات مربوط به بخش های ذیل مورد نیاز است:

یکی از مواردی که در عملکرد حلقه و توان اصطکاکی اتلافی حلقه دارای تأثیر بسزایی است ضریب اصطکاک پوشش‌های مورد استفاده در حلقه می‌باشد که در شکل ۶ نشان داده شده است.



شکل ۶: مقایسه ضریب اصطکاک، روکش‌های پیشنهادی با روکش مینا در دمای محیط

یکی دیگر از پارامترهای تأثیر گذار در مقدار مصرف روغن و توان اتلافی اصطکاکی موتور صافی سطح می‌باشد که این مشخصه در جدول ۳ این مشخصه نشان داده شده است.

جدول ۳: مشخصه‌های فیزیکی پوشش‌های نانومتری حلقه

Rq	مدول		سختی (Mpa)	نانو پوشش پیشنهادی
	Ra (nm)	الاستیسیته (Mpa)		
۷۰	۶۰	۲۷۹۰۰۰	۱۱۲۰	کروم (Cr)
۶	۵	۳۰۰۰۰۰	۱۷۰۰۰	نیتراک کروم (Cr-N)
				نیتراک کروم
۱۲	۱۰	۴۰۰۰۰۰	۲۴۰۰۰	آلومینیوم (Cr-AL-N)
۹	۷	۳۸۰۰۰۰	۲۸۰۰۰	نیوبیم (Cr AL N -Nb)
۱۵	۱۳	۳۰۰۰۰۰	۲۳۰۰۰	رنیوم (Cr AL N -Re)

معادلات

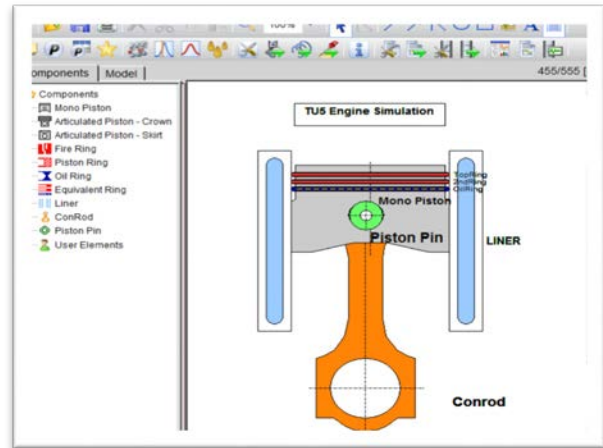
معادلات حاکم در فاصله بین حلقه سنبه و بوش لاینر در مقطعی از طول حرکت سنبه در بوش لاینر که بصورت هیدرودینامیکی می‌باشند با حل معادله‌ی رینولدز بدست می‌آید:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{h^3 \partial p}{\mu \partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{h^3 \partial p}{\mu \partial z} \right) = 6U \frac{\partial h}{\partial x} \quad (1)$$

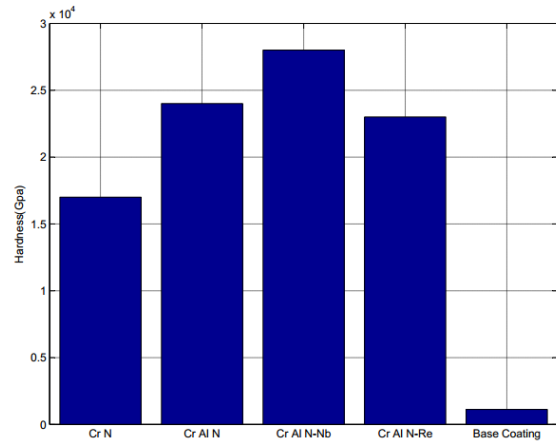
که در آن:

P: فشار فیلم روغن (Pa)

پس از وارد کردن اطلاعات ورودی مربوط به موتور مورد مطالعه به عنوان موتور مینا و کامل شدن مجموعه سنبه و لاینر مطابق شکل ۴، با توجه به اینکه یکی از اهداف اصلی این پژوهش بررسی تأثیر استفاده از نانو پوشش‌ها در حلقه با در نظر گرفتن مشخصه‌های عملکردی آن می‌باشد، در شکل ۵ مقدار سختی روکش‌های پیشنهادی بر مبنای جدول ۲ نشان داده شده است.



شکل ۴: مدل یک بعدی مجموعه سنبه و لاینر در محیط Piston&Ring



شکل ۵: مقایسه سختی، روکش‌های پیشنهادی جهت استفاده در حلقه موتور TU5 با روکش مینا

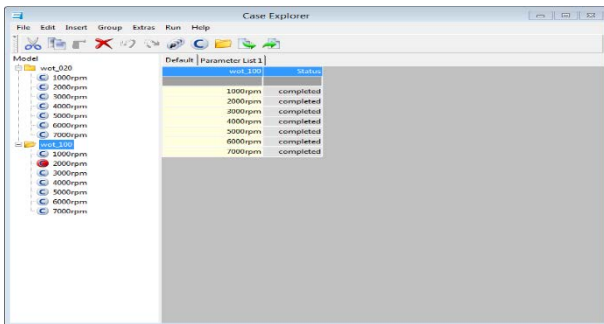
جدول ۲: پوشش‌های نانومتری های پیشنهادی جهت استفاده در حلقه‌ها

حلقه اول	روکش مینا ۱		روکش مینا ۲	
	روکش ۳	روکش ۴	روکش ۳	روکش ۴
حلقه اول	نیتراک کروم	نیتراک کروم	نیتراک کروم	نیتراک کروم
حلقه دوم	سخت کروم	سخت کروم	سخت کروم	سخت کروم
حلقه سوم	سخت کروم	سخت کروم	سخت کروم	سخت کروم

$$\mu = f \left(\frac{v}{A \cdot v^2 + B \cdot |v| + C} + D \cdot v \right) \quad (۸)$$

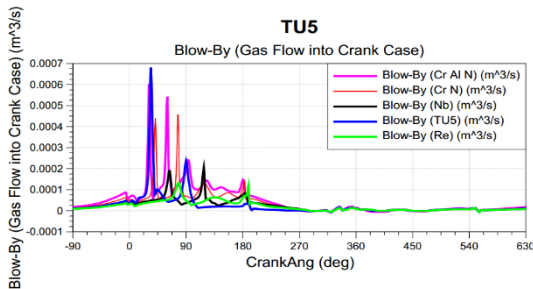
بررسی نتایج شبیه‌سازی یک‌بعدی موتور

یکی از وظایف اصلی حلقه آب بندی محافظه احتراق با محافظه لنگ می‌باشد که برای بررسی این ویژگی عملکردی حلقه با در نظر گرفتن پوشش‌های پیشنهادی، پس از تعریف پوشش‌ها در محیط Case Explorer، مطابق شکل ۷ به بخش Piston&Ring رفته و با تعریف شرایط عملکردی موتور و پارامترهای تحت بررسی با انتخاب RUN نرم افزار شروع به محاسبه و تحلیل مدل تحت بررسی خواهد نمود. لازم به ذکر است مدت زمان شبیه‌سازی معادل ۵۰ ساعت آزمون تجربی می‌باشد که این مدت زمان با توجه به رویه انجام آزمون تجربی انتخاب شده است.



شکل ۷ - تعریف شرایط عملکردی و پارامترهای تحت بررسی در محیط Piston&Ring

همانطور که در شکل ۸ نشان داده شده است، تاثیر استفاده از پوشش‌های پیشنهادی به وضوح در مقایسه با پوشش مورد استفاده در موتور مینا قابل تشخیص می‌باشد. با توجه به نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی (معادل ۵۰ ساعت آزمون)، بیشترین مقدار بلو بای^۱ مربوط به حالت مینا می‌باشد که مقدار آن برابر ۰/۰۰۰۶۸ مترمکعب بر ثانیه و کمترین مقدار آن مربوط به پوشش Re و برابر ۰/۰۰۰۱۴ مترمکعب بر ثانیه می‌باشد. که نشان دهنده کاهش ۷۹ درصدی بلو بای با استفاده از پوشش CR Al N Re در مقایسه با پوشش مینا می‌باشد.



شکل ۸: میزان بلو بای با استفاده از پوشش نانو در حلقه موتور TU5

h: ضخامت کمینه فیلم (m)

U: سرعت متوسط فیلم (m/s)

μ: لزجت دینامیکی (pa.s)

X: جهت طولی فیلم (m)

Z: جهت عرضی فیلم (m)

نیروی اصطکاکی سنبله (F_f Piston Liner) از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$F_f \text{ Piston Liner} = F_n \mu \quad (۲)$$

برای محاسبه ضریب اصطکاک بین سمبه و استوانه (μ) با استفاده از معادله Stribeck(Speed) داریم:

$$\mu = f \left(\frac{v}{A \cdot v^2 + B \cdot |v| + C} + D \cdot v \right) \quad (۳)$$

که در آن

v: سرعت متوسط سنبله (m/s)

A: ۷۵ متر بر ثانیه برابر موتورهای بنزینی احتراق داخلی

B: بدون بعد برابر صفر

C: ۵,۱ متر بر ثانیه

D: $(-۴) \cdot (۱۰ \times ۶/۳)^{-۱}$ متر بر ثانیه برای موتورهای بنزینی

f: ضریب مقیاس کلی

برای محاسبه نیروی تماس بین استوانه و سطح حلقه ($F_{contact}$) داریم:

$$F_{contact} = F_{gas} + F_{tension} + F_{friction} \quad (۴)$$

که در آن F_{gas} : نیروی احتراق، $F_{tension}$: نیروی کششی و $F_{friction}$: نیروی اصطکاک می‌باشد.

برای حل معادلات مربوط به نیروی اصطکاکی بین حلقه و استوانه با استفاده از رابطه STRIBECK (Speed) در نرم افزار داریم:

$$F_{fric} \left(\frac{ring}{Liner} \right) [N] = f \left[-sign(v) \cdot A \cdot \sqrt{|v|} \right] \left[1 - B \cdot \frac{E - T_0}{T_0} \right] \left[1 - K_v \frac{p(\theta) - p_0}{p} \right] \left(\frac{d}{d_0} \right) \quad (۵)$$

برای محاسبه نیروی تماس بین حلقه و شیار حلقه ($F_{contact}$) داریم:

$$F_{contact} = F_{gas} + F_{mass} + F_{friction} + F_{bend} \quad (۶)$$

که در آن: F_{bend} نیروی وارد بر شیار می‌باشد.

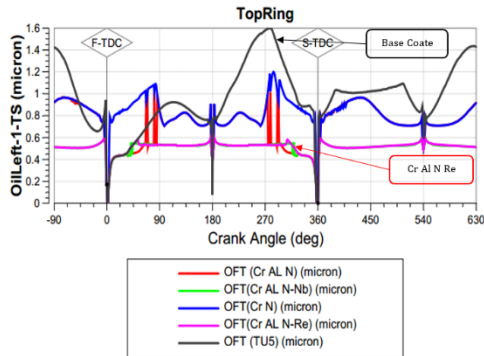
نیروی اصطکاکی حلقه و شیار حلقه (F_f Ring Side) از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$F_f \text{ Ring Side} = F_n \mu \quad (۷)$$

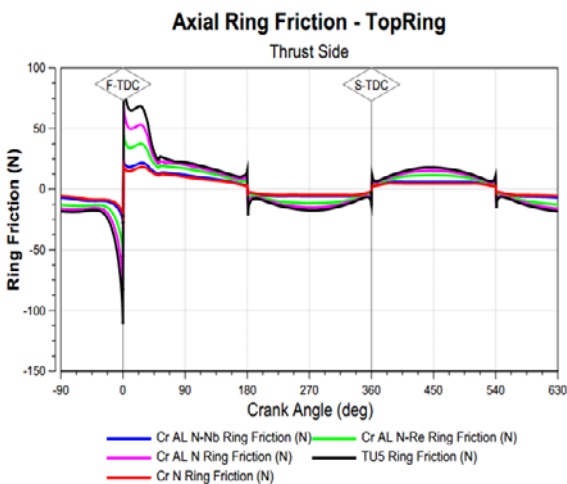
برای محاسبه اصطکاک یاتاقان های چشم بزرگ دسته سمبه (μ) با استفاده از معادله Stribeck(Speed) داریم:

¹ Blow by

در ادامه به بررسی میزان نیروی اصطکاک با استفاده از پوشش‌های پیشنهادی در حلقه پرداخته شده است. همانطور که در شکل ۱۲ مشاهده می‌شود در حلقه اول بیشترین مقدار نیروی اصطکاک در زاویه صفر درجه رخ می‌دهد که در این زاویه بیشینه مقدار مربوط به موتور مینا و برابر ۸۵ نیوتن می‌باشد و کمترین آن مربوط به پوشش Cr N و برابر ۲۵ نیوتن متر می‌باشد.



شکل ۱۱: میزان ضخامت روغن با پوشش نانو در حلقه اول موتور TU5



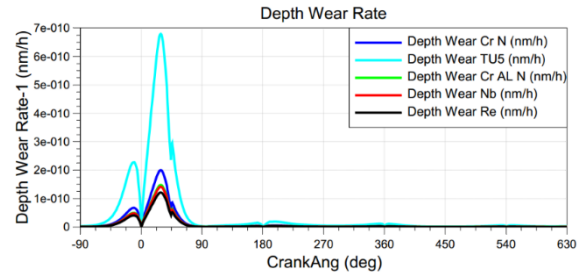
شکل ۱۲: نیروی اصطکاک با پوشش نانو در حلقه اول موتور TU5

بیشترین نیروی وارده بر فیلم روغن واسطه فشار در اثر احتراق می‌باشد با توجه به اینکه بیشینه فشار حاصل از احتراق در زاویه تقریباً ۴۵ درجه بعد از احتراق رخ می‌دهد لذا بیشترین نیروی وارد بر فیلم روغن تقریباً برای همه پوشش هادر همین زاویه می‌باشد همانطور که در شکل ۱۳ مشاهده می‌شود مقدار این نیرو برابر با ۹۰۰ نیوتن می‌باشد.

با توجه به شکل ۱۴ بیشترین میزان اتلاف اصطکاک در محدوده میانی نقاط مکث بالا و مکث پایین در حین حرکت سمبه رخ می‌دهد که بیشترین این اتلاف اصطکاک مربوط به روکش مینای موتور TU5 برابر ۶۷۰ وات و کمترین آن مربوط به پوشش نیتراک کروم آلومینیوم آلیاژی با نینوم برابر ۲۰۰ وات می‌باشد.

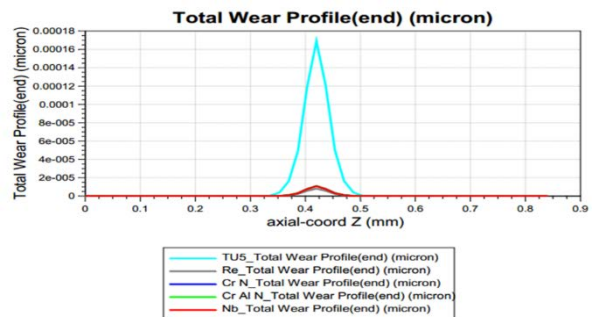
یکی از مواردی که همواره مورد توجه شرکت های توسعه دهنده موتورهای احتراق داخلی می‌باشد کاهش توان اتلافی اصطکاک در

یکی از مشخصه های اصلی حلقه در کنار آب بندی فضای میان محفظه احتراق و محفظه لنگ، مقاومت در برابر سایش می‌باشد. در شکل ۹ تأثیر استفاده از پوشش‌های پیشنهادی در مقاوت در برابر سایش به وضوح در مقایسه با پوشش مینا نشان داده شده است. با توجه به نتایج همانطور که مشاهده می‌شود کمترین مقدار سایش مربوط به استفاده از پوشش نانو RE برابر 10^{-8} نانومتر بر ساعت و بیشینه مقدار آن در حلقه موتور TU5 برابر 10^{-6} نانومتر بر ساعت می‌باشد. که نشان دهنده کاهش ۸۳ درصدی سایش به استفاده از پوشش کروم آلومینیوم نیکل رویوم در مقایسه با موتور مینا می‌باشد.



شکل ۹: میزان سایش با استفاده از پوشش نانو در موتور TU5

با توجه به شکل ۱۰، بیشینه مقدار سایش کل در سطح بیرونی حلقه نسبت به محور Z در فاصله ۰٫۳۲ تا ۰٫۵ میلی متر قرار دارد که با توجه به سطح بیرونی حلقه بیشترین تماس حلقه و استوانه در این ناحیه قرار دارد و همچنین در نمونه های تحت بررسی بیشترین سایش کل برای موتور TU5 با حلقه مینا می‌باشد که مقدار آن برابر 1.8×10^{-3} میکرون و در باقی نمونه های تحت بررسی در محدوده 1.5×10^{-5} قرار دارد.

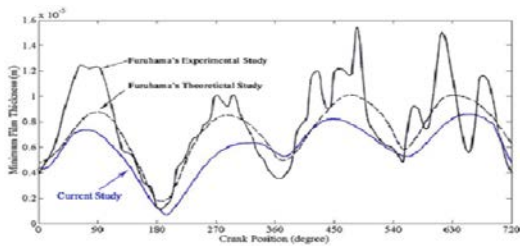


شکل ۱۰: کل سایش با استفاده از پوشش نانو در موتور TU5

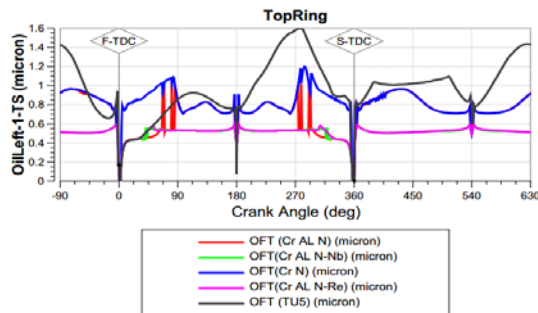
به طور کلی مقدار ضخامت فیلم روغن در نقاط مکث بالا و مکث پایین به کمترین مقدار خود می‌رسد و سپس با تغییر جهت سنبه مقدار این ضخامت افزایش می‌یابد. در شکل ۱۱ به بررسی ضخامت فیلم روغن در حلقه اول پرداخته شده است که حداقل مقدار فیلم روغن مربوط به موتور مینا و در زاویه ۳۶۰ درجه برابر ۰/۰۵ میکرون می‌باشد و کمترین مقدار فیلم روغن مربوط به پوشش Re برابر ۰/۴ می‌باشد. که نشان دهنده افزایش ۸۷/۵ درصدی فیلم روغن به استفاده از پوشش کروم آلومینیوم نیکل رویوم در مقایسه با موتور مینا می‌باشد.

بحث بر روی نتایج

مهمترین پارامتری که در روانکاری محل تماس حلقه و استوانه بایستی بررسی شود کمترین ضخامت لایه روانکار در طول یک چرخه کامل موتور می باشد. به همین دلیل در کار حاضر شکل ۱۷ این پارامتر به منظور صحت گذاری بر درستی کار با نتایج کار تجربی آقای فوروهاما و همکارانش [۱۷] مقایسه شده است که در شکل ۱۶ مشخص می باشد. همانطور که ملاحظه می شود روند تغییرات لایه روانکار حاصل از کار حاضر با نتایج تجربی مطابقت دارد و اختلاف موجود در اندازه ضخامت به دلیل تفاوت در پارامترهای ورودی نظیر ابعاد، فشار گاز احتراق و شعاع پروفیل و تنش الاستیک حلقه می باشد.



شکل ۱۶ - تغییرات حداقل ضخامت لایه روانکار در چرخه کاری موتور - نتایج کار تجربی مرجع [۱۷]

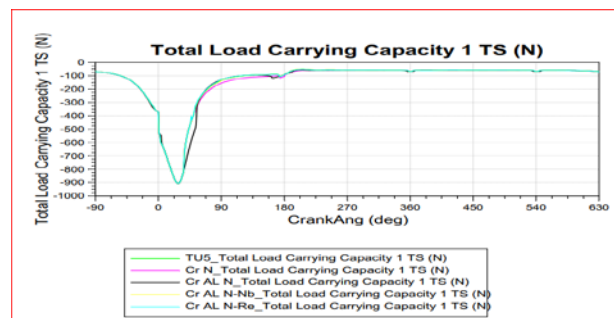


شکل ۱۷: میزان ضخامت روغن با پوشش نانو در حلقه اول موتور TU5

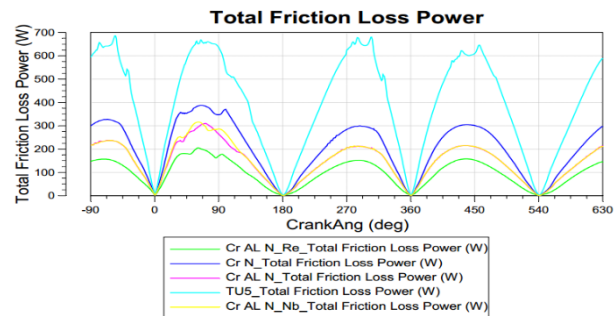
پارامتر دیگری که در روانکاری محل تماس حلقه و استوانه باید بررسی شود میزان بخار روغن در طول یک چرخه کامل موتور می باشد (شکل ۱۸) به منظور صحت گذاری نتایج با آزمون تجربی بخار موتور TU5 در شرکت ایپکو با نتایج استخراج شده بخار روغن در نرم افزار در شکل ۱۹ مقایسه شده است که با تبدیل واحد متر مکعب بر ثانیه به لیتر بر دقیقه عدد ۴۰/۵ لیتر بر دقیقه بدست می آید با توجه به بدست آوردن عدد زیر سطح منحنی نتیجه نرم افزار با نتیجه آزمون تجربی برابر می باشد.

به منظور مقایسه بهتر و انتخاب بهترین پوشش برای حلقه نتایج استخراج شده در نرم افزار مطابق جدول ۴ تدوین شده است که پوشش نیترا کروم آلومینیوم آلیاژ سازی شده با رنیوم با در نظر گرفتن همه فاکتورها، مناسب ترین پوشش می باشد.

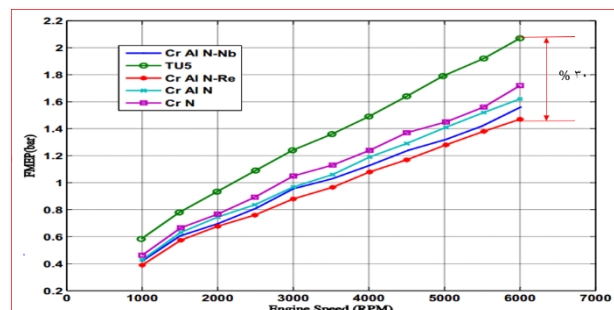
موتور می باشد همانطور که اشاره شد بخشی از این توان اتلافی مربوط به تماس میان حلقه و لاینر می باشد که در شکل ۱۵ تأثیر استفاده از پوشش های پیشنهادی بر روی توان اتلافی اصطکاکی نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می شود در حالت تمام بار با افزایش دور توان اتلاف اصطکاکی افزایش می یابد و بیشینه مقدار آن در دور ۶۰۰۰ دور در دقیقه می باشد با توجه به نتایج بدست آمده در این دور، بیشترین مقدار اتلاف اصطکاکی مربوط به موتور مینا و برابر ۲/۰۵ بار و کمترین مقدار آن در همین دور مربوط به پوشش کروم نیکل آلومینیوم با ریوم (Cr Al N Re) و برابر ۱/۴۵ بار می باشد. که نتایج نشان دهنده کاهش ۳۰ درصدی اتلاف اصطکاکی با استفاده از پوشش (Cr Al N Re) می باشد.



شکل ۱۳: نیروی وارد بر فیلم روغن با استفاده از پوشش نانو در موتور TU5



شکل ۱۴: اتلاف اصطکاکی با استفاده از پوشش نانو در موتور TU5



شکل ۱۵ - فشار موثر متوسط اصطکاکی با پوشش نانو در موتور TU5

اضافی در روکش CrAIN برای کاهش اصطکاک انتخاب گردید که خاصیت خود روان کننده در دماهای بالا را دارد، که با توجه به نتایج بدست آمده از این تحقیق، استفاده از پوشش نانو دارای مزیت های ذیل می باشد:

- کاهش ۷۹ درصدی میزان بخارها روغن با استفاده از پوشش CR Al N Re
- کاهش ۸۳ درصدی سایش به استفاده از پوشش CR Al N Re
- کاهش ۴۰ درصدی نیروی اصطکاکی در حلقه اول با استفاده از پوشش CR Al N Re
- کاهش ۳۰ درصدی اتلاف اصطکاکی با استفاده از پوشش CR Al N Re

مراجع و منابع

[1] Richardson, D.E., Review of power cylinder friction for diesel engines. TRANSACTIONS-AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS JOURNAL OF ENGINEERING FOR GAS TURBINES AND POWER, 2000. 122(4): p. 506-519.

[2] Ruddy, B., D. Dowson, and P. Economou, The prediction of gas pressures within the ring packs of large bore diesel engines. Journal of Mechanical Engineering Science, 1981. 23(6): p. 295-304.

[3] Ting, L., A review of present information on piston ring tribology. 1985, SAE Technical Paper.

[4] Castleman Jr, R., A hydrodynamical theory of piston ring lubrication. Physics, 1936. 7(9): p. 364-367.

[5] Eilon, S. and O. Saunders, A study of piston-ring lubrication. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, 1957. 171(1): p. 427-462.

[6] FURUHAMA, S., A Dynamic Theory of Piston-Ring Lubrication: 2nd Report, Experiment. Bulletin of JSME, 1960. 3(10): p. 291-297.

[7] Ting, L. and J. Mayer Jr, Piston Ring Lubrication and Cylinder Bore Wear Analysis, Part I—Theory1. Journal of Lubrication Technology JULY, 1974: p. 305.

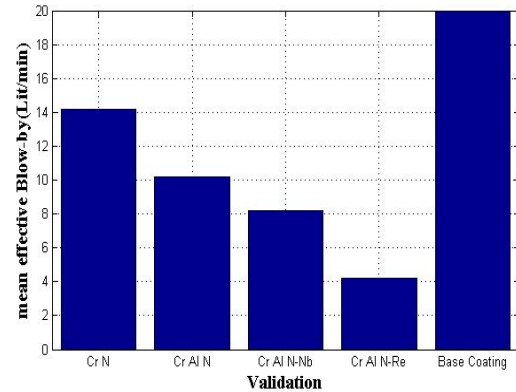
[8] Patir, N. and H. Cheng, An average flow model for determining effects of three-dimensional roughness on partial hydrodynamic lubrication. Journal of lubrication Technology, 1978. 100(1): p. 12-17.

[9] Greenwood, J. and J. Tripp, The contact of two nominally flat rough surfaces. Proceedings of the institution of mechanical engineers, 1970. 185(1): p. 625-633.

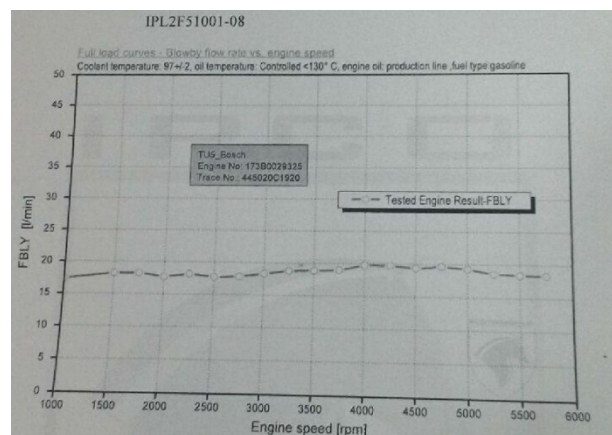
[10] Rohde, S.M., A mixed friction model for dynamically loaded contacts with application to piston ring lubrication. 1980: General Motors Research Laboratories.

[11] Priest, M. and C. Taylor, Automobile engine tribology—approaching the surface. Wear, 2000. 241(2): p. 193-203.

[12] Mufti, R.A., M. Priest, and R.J. Chittenden. Experimental and theoretical study of instantaneous



شکل ۱۸: میزان متوسط بلوبای با پوشش نانو در حلقه موتور TU5



شکل ۱۹: نتایج آزمون تجربی بخارهای روغن موتور TU5

جدول ۴: مقایسه نتایج استخراج شده از نرم افزار AVL برای موتور TU5

پوشش	میزان سایش در سیکل	کمترین ضخامت فیلم روغن	اتلاف اصطکاکی	مقدار نشتی بخار موتور در زاویه 0 تا 90 درجه	اصطکاک موثر متوسط نرمی FMEP(bar) (6000)RPM
نیترات کرم آلومینیوم رنیوم Cr Al N-Re	0.00002	0.4 میکرون	200w	0.00014	1.45
نیترات کرم آلومینیوم نیوبیوم Cr Al N- Nb	0.00004	0.35 میکرون	280w	0.00020	1.55
نیترات کرم آلومینیوم Cr Al N	0.00004	0.2 میکرون	300w	0.00044	1.6
نیترات کرم Cr N	0.00005	0.1 میکرون	390w	0.00046	1.7
کروم سخت Base	0.00018	0.02 میکرون	680w	0.00068	2.1

نتیجه گیری

هدف این تحقیق ارزیابی مفاهیم پوشش های جدید برای حلقه سنبه ها است، که در آن هدف اصلی کاهش اصطکاک و سایش می باشد. آلیاژ سازی CrN با آلومینیوم، سختی و همین طور اکسایش و مقاومت سایشی را بهبود می دهد. Re و Nb به عنوان یک عنصر آلیاژی

- [15] Smith, T., et al., Lateral side protection of a piston ring with a thermally sprayed coating. 2008, Google Patents.
- [16] Ferrarese, A., et al., Piston ring tribological challenges on the next generation of flex-fuel engines. SAE International Journal of Engines, 2010. 3(2010-01-1529): p. 85-91.
- [17] Furuhashi, S., Asahi, C., "Measurement of Piston Ring Oil Film Thickness in An Operating Engine". ASLE Trans. Volume 26, 3, 325-332 (1982)
- piston assembly friction in a gasoline engine. In Proceedings of. 2004.
- [13] Priest, M., D. Dowson, and C. Taylor, Predictive wear modelling of lubricated piston rings in a diesel engine. Wear, 1999. 231(1): p. 89-101.
- [14] McGeehan, J.A., A literature review of the effects of piston and ring friction and lubricating oil viscosity on fuel economy. 1978, SAE Technical Paper.



Investigating the effect of nanocoating on friction loss and abrasion in the piston rings

M. Kavand^{1*}, A. Tabrizi², O. Furotan³

¹IKCO University of Applied Science and Technology, Tehran, Iran, m.kavand@ikco.ir

²Iran Khodro Company, Tehran, Iran, a.tabrizi@ikco.ir

³IKCO University of Applied Science and Technology, Tehran, Iran, o.foroutan@ikco.ir

*Corresponding Author

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 11 January 2019

Accepted: 6 April 2019

Keywords:

IC engine

Piston ring

Nano-coating

Friction loss

Abrasion resistance

Oil film thickness

ABSTRACT

The piston ring which prepares mechanical sealing of a combustion chamber, should have significant abrasion resistance and less friction loss, using appropriate ring coating. The coating widely used is CrN, because of its good abrasion resistance at room temperature. However, it suffers from some shortcomings, such as high abrasion rate at temperatures above 200°C and lack of self-lubricating property. Although the abrasion behavior of various coatings has been widely investigated, a comprehensive comparing procedure is required to demonstrate the advantages of each coating. In this study, the effects of different Nano-coatings applied to the piston rings of the TU5 IC engine is investigated. The AVL software was used to create hydrodynamic lubrication model and solve numerically the related equations, such as Reynolds and friction loss and the parameters such as friction loss, abrasion, blow-by and oil film thickness were investigated. The results demonstrate that using the Nano-coating reduced friction loss and abrasion by 30 percent and 83 percent, respectively, and the mechanical sealing were improved by 79 percent.

