فصلنامهٔ علمی- پژوهشی تحقیقات موتور

تارنمای فصلنامه: www.engineresearch.ir

تأثیر گرانروی روغن در اصطکاک سامانه سمبه و حلقه با استفاده از آزمون‌های تجربی و معادلات نیمه تجربی در حالت موتورگردانی

مجتبی محرابی وقار[۱]، محمدعلی احترام*[۲]

[۱] شرکت تحقیق، طراحی و تولید موتور ایران خودرو، تهران، ایران، m_mehrabi@ip-co.com

[۲] دانشکده مهندسی مکانیک و انرژی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران، m_ehteram@sbu.ac.ir

* نویسندهٔ مسئول

چکیده

یکی از موضوعات بسیار مهم که در راندمان موتور تأثیر بسزایی دارد اصطکاک داخلی موتور است. یکی از عوامل مهمی در که در اصطکاک موتور نقش دارد نوع روغن و گرانروی آن است. در این مقاله سعی شده با اندازه‌گیری مقدار اصطکاک سامانه حلقه و سمبه موتور به روش موتورگردانی با دو نوع روغن 10W40 و 20W50 با گرانروی‌های مختلف و در دماهای ۳۵، ۶۰ و ۹۰ درجه سانتی‌گراد چگونگی اثر گرانروی را در دماهای مختلف بر اصطکاک این سامانه اندازه‌گیری نماییم. همچنین در گام بعدی با استفاده از معادلات نیمه تجربی حاکم بر اصطکاک و مقایسه آن با نتایج حاصل از آزمون تجربی، صحه‌گذاری این معادلات صورت گرفت. در گام نهایی ضرایب معادلات حاکم بر اصطکاک مجموعه حلقه و سمبه برای دماهای دیگر که اندازه‌گیری در آن نقاط صورت گرفت صحه‌گذاری شد و میزان اصطکاک حلقه و سمبه به‌صورت جدا در دماهای مختلف به دست آمد. نتایج آزمون تجربی نشان از تأثیر تغییر گرانروی روغن در دماهای ۳۵ و ۶۰ درجه سانتی‌گراد دارد و در دمای ۹۰ درجه سانتی‌گراد اثر آن ناچیز می‌شود. همچنین نتایج حاصل از معادلات نیمه تجربی نشان می‌داد که سهم اصطکاک حاصل از دامن سمبه بیشتر از اصطکاک حلقه‌ها بوده و همچنین اصطکاک دامن سمبه با افزایش دور افزایش می‌یابد و در حلقه‌ها با افزایش دور کاهش می‌یابد که دلیل آن تفاوت رژیم روان کاری است. همچنین ضرایب معادلات نیمه تجربی برای دماهای ۳۵ و ۶۰ درجه سانتی‌گراد بسط داده شد.

اطلاعات مقاله

تاریخچهٔ مقاله:

دریافت: ۱ دی ۱۳۹۶

پذیرش: ۲ اسفند ۱۳۹۶

کلیدواژه‌ها:

اصطکاک

سمبه

حلقه

گرانروی

تمامی حقوق برای انجمن علمی موتور ایران محفوظ است.

۱- مقدمه

یکی از مسائل مهم در موتورهای احتراق داخلی، راندمان موتوراست. امروزه سعی بر آن است تا با پائین آوردن اصطکاک داخلی موتور میزان راندمان موتور را افزایش دهند. یکی از مجموعه‌های تأثیرگذار در اصطکاک داخلی موتور اصطکاک مجموعه حلقه و سمبه است که بیشترین سهم را در تولید اصطکاک موتور نسبت به سامانه‌های دیگر دارد. یکی از عوامل تأثیرگذار در اصطکاک کلی موتور و همچنین اصطکاک سامانه سمبه و حلقه‌ها، نوع روغن و گرانروی موتور است. در این مقاله ابتدا نتایج حاصل از آزمون تجربی به همراه شرح مختصری از رویه آزمون و نقاط کاری آزمون ارائه خواهد شد. در مرحله بعد تشریح نتایج حاصل از آزمون در دماهای مختلف انجام می‌گیرد سپس با استفاده از معادلات نیمه تجربی حاکم بر اصطکاک سامانه حلقه و سمبه موتور نتایج آزمون با این معادلات مقایسه می‌شود. برای محاسبه اصطکاک سامانه حلقه و سمبه به کمک معادلات نیمه تجربی حاکم بر اصطکاک این سامانه از معادلات فرگوسن[۱] [۱] بهره گرفته‌شده است.

در بیشتر مقالات مرتبط با گرانروی روغن به بررسی اثر آن در سایش قطعات مهم نظیر یاتاقان‌های موتور پرداخته‌شده است.

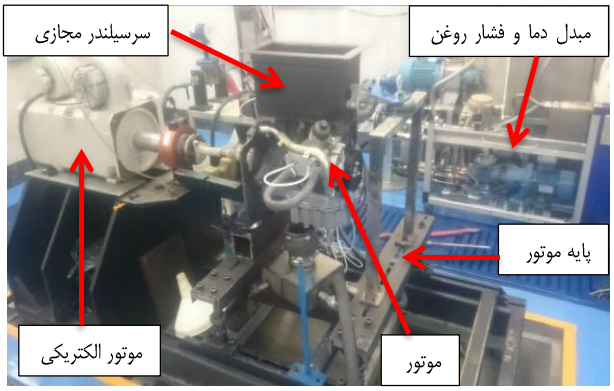
آقایان ترهان[۲] و کیویو[۳] به بررسی اثر تغییر گرانروی و محتویات روغن در سایش و اصطکاک پرداختند. در آزمایش‌هایشان از سمبه و صفحه‌ای برای شبیه‌سازی استوانه موتور که نسبت به هم حرکت رفت و برگشتی داشتند استفاده کردند. آزمون‌ها در بارها و دماهای مختلف انجام پذیرفت و با تغییر محتویات روغن از قبیل سوت و ذرات معلق سطح سایشی حلقه را اندازه‌گیری می‌کردند. ایشان دریافتند که افزایش سوت در روغن در سایش استوانه تأثیر بیشتری نسبت به حلقه دارد. همچنین نتایج آزمون‌های حاکی از آن بود که اثر گرانروی روغن در اصطکاک این سامانه در بارهای زیاد و شرایط روغن‌کاری مرزی بیشتر است[۲].

گوره[۴] و تاکر[۵] با طراحی استوانه شناور در شرایط دور و بار مختلف موتور رژیم روغن‌کاری، به بررسی اثر رژیم‌های مختلف روغن‌کاری در اصطکاک مجموعه حلقه و سمبه پرداختند. ایشان دریافتند که حفظ رژیم روانکاری ترکیبی در نقطه مرگ بالای[۶] سمبه باعث کاهش اصطکاک در حلقه‌ها می‌شود اما به علت نشت روغن مصرف روغن زیاد می‌شود[۳].

در این تحقیق، تأثیر دما و گرانروی روغن بر اصطکاک مجموعهٔ سمبه حلقه به‌صورت تجربی اندازه‌گیری شده است. همچنین قابلیت معادلات نیمه تجربی برای پیش‌بینی وضعیت اصطکاک سمبه و حلقه ارزیابی‌شده است. وجه تمایز این تحقیق نسبت به فعالیت‌های مشابه، تعمیم روابط نیمه تجربی برای دماهای ۳۰ و ۶۰ درجهٔ سانتی‌گراد است.

۲- روش آزمون تجربی

برای انجام آزمون اصطکاکی روی مجموعه حلقه و سمبه موتور ملی از روش موتورگردانی استفاده شد. در این روش برای به دست آوردن اصطکاک هر یک از سامانه‌های موتور ابتدا اصطکاک کلی موتور را به دست می‌آوردند. برای به دست آوردن اصطکاک از یک موتور الکتریکی برای چرخاندن میل‌لنگ موتور استفاده می‌شود. بعد از اندازه‌گیری اصطکاک کل موتور اقدام به جدا کردن هر یک از سامانه‌های موتور می‌کنند. مقدار اصطکاک بعد از باز کردن هر سامانه از روی موتور از اصطکاک کل موتور کم می‌شود و درنهایت مقدار اصطکاک سامانهٔ موردنظر به دست می‌آید. به‌این‌ترتیب هر سامانه که از روی موتور کم می‌شود اصطکاک آن نیز از اصطکاک کل موتور کسر می‌شود. درنهایت برای به دست آوردن اصطکاک مجموعه حلقه سمبه باید اصطکاک مجموعه میل‌لنگ، حلقه و سمبه را در شرایطی به دست آورد که فقط همین سامانه‌ها روی بدنه باشند و در انتها سمبه و حلقه‌ها را بازکرده و اصطکاک میل‌لنگ را به‌تنهایی اندازه‌گیری کرد. در انتها اصطکاک مجموعهٔ لنگ و لغزنده از اصطکاک مجموعه لنگ کسر می‌شود و درنهایت اصطکاک مجموعه حلقه و سمبه به‌طور مستقل محاسبه می‌شود. لازم به ذکر است که این آزمون طبق دستورالعمل شرکت FEV[۷] آلمان انجام‌گرفته است. گفتنی است این آزمون می‌تواند در دماهای روغن و آب مختلف انجام شود که در این تحقیق اندازه‌گیری‌ها در دماهای ۳۵، ۶۰ و ۹۰ درجه سانتی‌گراد انجام‌گرفته است[۴]. شکل ۱ نمایی از اتاق آزمون اصطکاکی و تجهیزات مهم آن نشان می‌دهد.



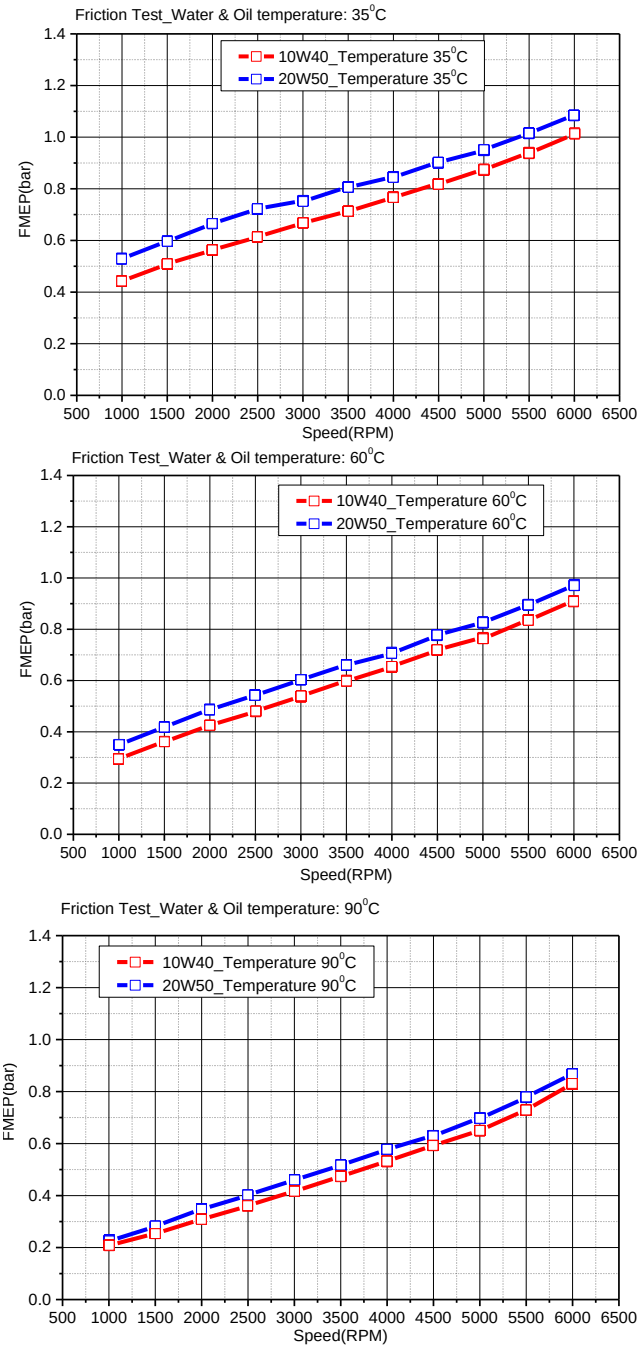
شکل ۱: نمایی از اتاق آزمون اصطکاکی (حالت موتورگردانی)

موتور الکتریکی استفاده‌شده در اتاق اصطکاکی دارای بیشینه توان تولیدی آن برابر ۶۰ کیلووات و بیشینه گشتاور ۱۴۳ نیوتن متر بوده و بیشینه سرعت این موتور الکتریکی ۱۰۰۰۰ دور می‌باشد و همچنین ولتاژ تغذیه آن برابر ۳۶۰ ولت و جریان مصرفی ۱۱۳ آمپر می‌باشد.

1 - Ferguson
2 Truhan
3 un Qu
4 Gore
5 Theaker
6 - TDC
۷ – یکی از شرکت‌های شناخته‌شده درزمینه طراحی و آزمون‌های موتوری

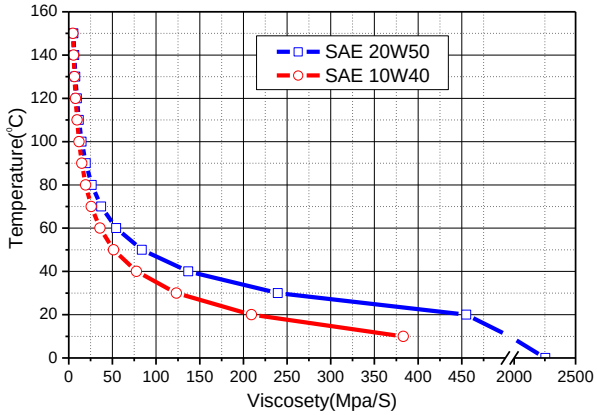
۳- نتایج آزمون

نتایج تجربی آزمون اصطکاک مجموعه حلقه و سمبه برای موتور ملی ۴ استوانه در شرایطی که دمای آب و روغن‌موتور روی ۳۵، ۶۰ و ۹۰ درجه سانتی‌گراد ثابت‌شده بود با دو نوع روغن 10W40 و 20W50 در شکل ۲ نشان داده‌شده است. نتایج نشان داده‌شده همان‌طور که در روش آزمون اشاره شد نتایج آزمون مستقل نبوده و از کسر نتایج آزمون با سامانه میل‌لنگ و سمبه‌ها از آزمون فقط با میل‌لنگ حاصل‌شده است. همان‌طور که در شکل ۲ مشخص است با افزایش سرعت موتور، اصطکاک تقریباً به‌صورت خطی افزایش می‌یابد.



شکل ۲: نتایج تجربی آزمون اصطکاک برای مجموعه حلقه و سمبه موتور در دماهای ۳۵، ۶۰ و ۹۰ درجه سانتی‌گراد

دلیل افزایش اصطکاک با افزایش سرعت موتور، به خاطر افزایش مسافت طی شده سمبه در واحد زمان می‌باشد که باعث بالا رفتن مقدار ضریب اصطکاک می‌شود. همچنین با گرم شدن روغن و کاهش گرانروی روغن نسبت به دما اختلاف اصطکاک کمتر می‌شود. دلیل این امر نزدیک شدن مقدار گرانروی دو نوع روغن 10W40 و 20W50 در دماهای بالاتر است که در ادامه شرح داده می‌شود. مقدار گرانروی برای دو نوع روغن 10W40 و 20W50 در شکل ۳ آمده است.



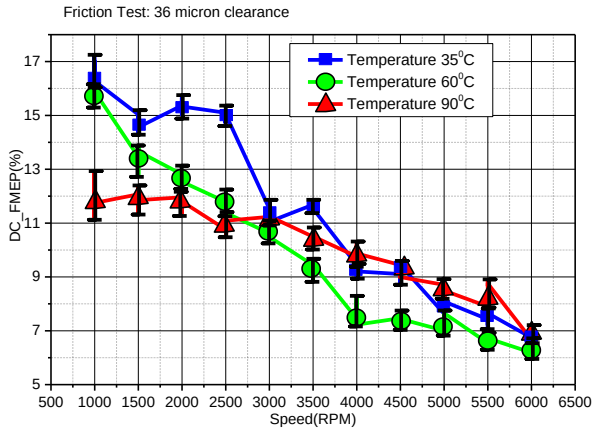
شکل ۳: گرانروی روغن برحسب دما برای دو روغن 10W40 و 20W50

گفتنی است نتایج حاصل‌شده در حالت موتورگردانی است و بدون در نظر گرفتن احتراق موتور است. به‌منظور تحلیل بهتر نتایج در ادامه صرفاً درصد اختلاف در اصطکاک برای دو نوع روغن 10W40 و 20W50 ارائه‌شده است.

شکل ۴، درصد اختلاف اصطکاک را با دو نوع روغن 10W40 و 20W50 در دماها و سرعت‌های مختلف نشان می‌دهد.

درصد اختلاف اصطکاک(DO_FMEP) مطابق رابطه زیر تعریف می‌شود:

$$\mathrm{DO_{FMEP}} = \frac{FMEP@sae20w50 - FMEP@sae10w40}{FMEP@sae10w40} \qquad (۱)$$



شکل ۴: درصد اختلاف اصطکاک با دو نوع روغن 10W40 و20W50

همان‌طور شکل ۴ نشان می‌دهد با کاهش دما، اختلاف بین اصطکاک با روغن 20W50 نسبت به 10W40 زیاد می‌شود. بیشترین مقدار اختلاف در نقطه‌ای که سرعت موتور برابر ۱۰۰۰ ددد و دمای روغن ۳۵ درجه سانتی‌گراد است اتفاق می‌افتد. با افزایش سرعت موتور، تأثیر نوع روغن بر اصطکاک کم می‌شود. بر اساس این نمودار استفاده از روغن 20W50 به‌جای 10W40 در بدترین حالت می‌تواند سبب افزایش ۱۶ درصدی اصطکاک مجموعهٔ حلقه و سمبه شود. مقدار اختلاف گرانروی در دمای ۳۰ درجه برای روغن 10W40 برابر ۱۲۳ مگاپاسگال در ثانیه است که این مقدار برای روغن 20W50 برابر ۲۳۹ مگاپاسگال در ثانیه است که تقریباً می‌توان گفت مقدار گرانروی در این دما برای روغن 20W50 نسبت به 10W40 حدود دو برابر است و این تغییر لزجت سبب افزایش اصطکاک ۱۶ درصدی در دور ۱۰۰۰ ددد می‌شود. اما مقدار گرانروی روغن در دمای ۹۰ درجه سانتی‌گراد برای روغن 20W50 برابر ۱۹٫۵ مگاپاسگال در ثانیه و برای روغن 10W40 برابر ۱۵ مگاپاسگال در ثانیه است.

درنهایت می‌توان نتیجه گرفت که دلیل اختلاف کم اصطکاک موتور با دو نوع روغن 20W50 نسبت به 10W40 در دماهای بالا نسبت به دماهای پایین به نرخ کاهش گرانروی دو نوع روغن با افزایش دما برمی‌گردد که نمودار ۲ نشان می‌دهد که با افزایش دما نرخ کاهش گرانروی برای هر دو نوع روغن به یک نقطه نزدیک می‌شود. دلیل نزدیک شدن مقدار اختلاف اصطکاک در سرعت‌های زیاد و دماهای مختلف مربوط به دمای موضعی روغن بین سطوح برمی‌گردد. با بالا رفتن سرعت، دمای روغن بین سطوح به‌صورت موضعی بالا رفته که این بالا رفتن دما همان‌طور که گفته شد باعث کم شدن مقدار اختلاف لزجت روغن شده که درنتیجه باعث کاهش در اصطکاک می‌شود. این در شرایطی است که دمای ذکرشده برای روغن مربوط به راهگاه اصلی روغن در بدنه موتور است و دمای روغن بین حلقه‌ها و استوانه تابع دمای روغن در راهگاه روغن نبوده و دمای حاصل از حرکت سطوح نسبت به هم غالب‌تر از دمای راهگاه بوده است. یعنی در شرایطی که دمای روغن در راهگاه اصلی موتور ۳۵ یا ۹۰ درجه سانتی‌گراد است اختلاف دمای روغن در سطح استوانه به دلیل حرکت سطوح بین حلقه و استوانه به این مقدار نبوده است. همچنین افزایش دمای متوسط آب و روغن از ۳۵ به ۹۰، علاوه بر کاهش لزجت روغن، سبب انبساط استوانه و افزایش لقی (بیشتر از لقی اولیه ۳۶ و ۶۶ میکرون) می‌شود. ازآنجاکه با افزایش لقی، تأثیر آن بر اصطکاک کم‌تر می‌شود در حالتی که دمای آب و روغن زیاد می‌شود، تأثیر لقی اولیه نیز کم می‌شود.

٤- معادلات نیمه تجربی

با توجه به گستردگی مبحث اصطکاک موتور، در هر یک از منابع، معادلات گوناگونی ارائه‌شده است. به‌طورکلی و با توجه به تحقیقاتی که در مقالات و کتاب‌های مختلف در این زمینه انجام‌شده است، تقریباً شکل کلی معادلات نیمه تجربی حاکم بر اصطکاک مجموعه حلقه و سمبه مشخص‌شده است. در این معادلات اصطکاک مجموعه حلقه و سمبه متأثر از اثر دامن سمبه، حلقه‌ها و فشار گاز می‌باشد. در این تحقیق برای محاسبه اصطکاک مجموعه حلقه و سمبه و مقایسه آن با موتور تحت آزمون از معادلات موجود در کتاب فرگوسن استفاده گردید. در این منبع همان‌طور که گفته شد اصطکاک مجموعه حلقه و سمبه شامل اصطکاک دامن سمبه، حلقه و فشار گاز پشت حلقه است. در معادله مربوط به اصطکاک دامن سمبه، اثر گرانروی روغن و سرعت متوسط سمبه به همراه قطر سمبه اثرگذار می‌باشند که در این منبع اثر گرانروی را به‌صورت ضریب C_{ps}[1] برای یک دمای معین (۹۰ درجه سانتی‌گراد) ارائه داده است. در این منبع معادله حاکم بر اصطکاک دامن سمبه در معادله۲ آمده است [۱].

$$fmep_{\,skirt} = C_{ps}\,\frac{\bar{U}_p}{b} \qquad (۲)$$

همان‌طور که در معادله ۲ مشخص است، فشار مؤثر متوسط اصطکاکی دامن سمبه وابسته به‌سرعت و قطر سمبه و همچنین ضریب C_{ps} می‌باشد. ضریب C_{ps} در این معادله برای دقت بیشتر جایگزین گرانروی روغن شده است. وجود گرانروی در این معادله حاکی از آن است که تغییر دمای روغن، در این معادله که اصطکاک دامن سمبه را محاسبه می‌کند، اثرگذار است. با توجه به ثابت بودن ضریب C_{ps} می‌توان نتیجه گرفت که معادله ارائه‌شده برای گرانروی مشخصی از روغن بوده و همه دماهای روغن را تحت پوشش قرار نمی‌دهد.

قطعه دیگری که در اصطکاک مجموعه سمبه و حلقه تأثیرگذار است، حلقه‌ها می‌باشد. اصطکاک حلقه‌ها تحت تأثیر نیروی حاصل از فشار گاز احتراق و نیروی فنری حلقه، هست. معمولاً مقدار نیروی فنری حلقه نقش مهمی در اصطکاک این قطعه دارد. ابتدا معادله مربوط به مقدار اصطکاکی که حلقه تحت تأثیر نیروی فنری تولید می‌کند، ارائه می‌شود. فرگوسن برای محاسبه فشار مؤثر متوسط اصطکاکی حلقه‌ها معادله ۳ را ارائه داده است. در این معادله نیز ضریب C_{pr}[2] تابعی از کشش حلقه می‌باشد که با ثابت فرض کردن آن مشخص می‌شود که کشش حلقه در این فرمول نیز مقدار ثابتی فرض شده است. معادله ۴-۵ معادله حاکم بر اصطکاک حلقه‌ها را نشان می‌دهد [1].

$$fmep_{\,rings} = C_{pr}\left(1+\frac{1000}{N}\right)\frac{1}{b^2} \qquad (۳)$$

با توجه به معادله ۳، سرعت موتور در میزان اصطکاک مجموعه حلقه‌ها اثر غالب دارد، به‌طوری‌که با کاهش سرعت موتور مقدار اصطکاک این مجموعه افزایش می‌یابد. این پدیده در سرعت‌های پایین‌تر از ۱۰۰۰ ددد مشهودتر است. همچنین عامل بعدی که در اصطکاک مجموعه حلقه‌ها تأثیرگذار بوده قطر استوانه است. با توجه به توان ۲ قطر استوانه

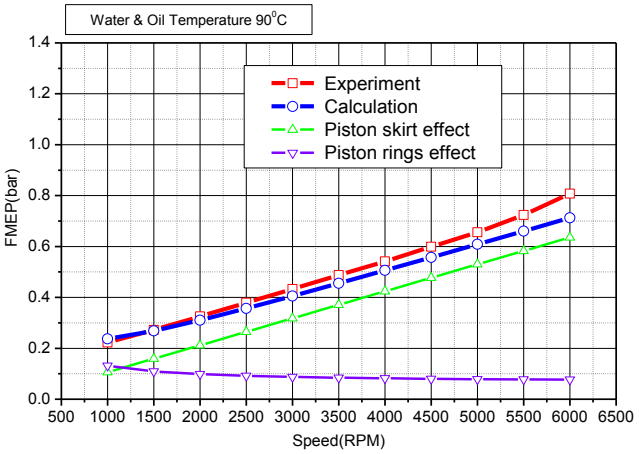
[1] - Cps=294 kPa-mm/s

[2] -Cpr= 4.06×104 kPa-mm2

که در مخرج معادله قرار دارد، مشخص می‌شود افزایش یا کاهش آن تأثیر زیادی در تغییر فشار مؤثر متوسط اصطکاکی دارد.

عامل تأثیرگذار بعدی در اصطکاک مجموعه سمبه و حلقه، فشار گاز است که با توجه به اینکه آزمون‌های تجربی در این تحقیق در شرایط موتورگردانی انجام‌شده است و در این آزمون‌ها فشار گاز بالای سمبه وجود ندارد، می‌توان از معادله اصطکاک ناشی از فشار گاز در محاسبات چشم‌پوشی کرد.

با توجه به روابط گفته‌شده برای محاسبه اصطکاک سامانه سمبه و حلقه، می‌توان اصطکاک حاصل از مجموعه سمبه و حلقه را در شرایط موتورگردانی محاسبه کرد و نتایج حاصل از آزمون تجربی را با معادلات حاکم بر اصطکاک سمبه و حلقه که در کتاب فرگوسن ارائه‌شده، مقایسه نمود. لازم به ذکر است که همان‌طور که گفته شد این روابط و بخصوص رابطه مربوط به اصطکاک دامن سمبه برای دمای استانداردی ارائه‌شده که نزدیک به دمای کاری موتور است که در آزمون‌های تجربی این دما که ۹۰ درجه سانتی‌گراد است نیز اندازه‌گیری شد. شکل ۵ مقایسه نتایج آزمون تجربی با نتایج حاصل از محاسبه فشار مؤثر متوسط اصطکاکی با توجه به معادلات نیمه تجربی حاکم بر مجموعه سمبه و حلقه را به همراه نمودار اصطکاک سمبه و حلقه به‌صورت جداگانه نشان می‌دهد.

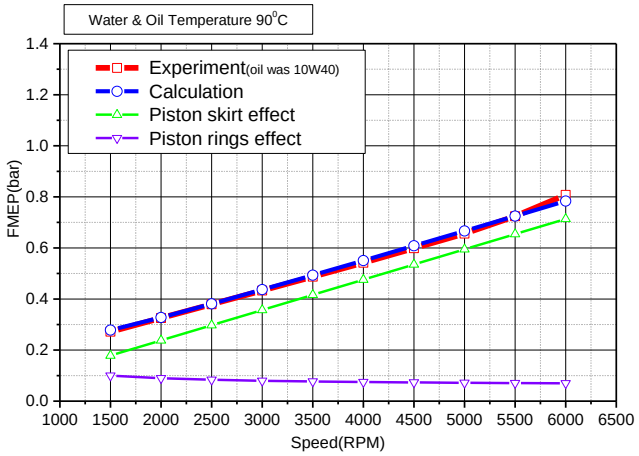


شکل ۵: مقایسه آزمون تجربی با نتایج حاصل از محاسبه فشار مؤثر متوسط اصطکاکی با توجه به معادلات حاکم بر مجموعه سمبه و حلقه

همان‌طور که شکل۵ نشان می‌دهد نتایج حاصل از محاسبات اصطکاک مجموعه سمبه و حلقه تطابق خوبی با آزمون‌های تجربی دارد که این نشانه صحت و دقت محاسبات اصطکاک سامانه حلقه و سمبه می‌باشد. همچنین در شکل ۵ نتایج حاصل از اصطکاک دامن سمبه و حلقه‌ها به‌صورت مجزا نماش داده‌شده است که به‌این‌ترتیب می‌توان به‌صورت دقیق‌تر از میزان تأثیر هرکدام بر اصطکاک را مشاهده نمود.

با توجه به نتایج محاسبات برای اصطکاک حاصل از دامن سمبه می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش سرعت موتور مقدار اصطکاک دامن سمبه نیز افزایش می‌یابد. دلیل این افزایش به خاطر افزایش مسافت طی شده سمبه در واحد زمان در سرعت‌های زیاد نسبت به سرعت‌های کم‌تر است. همچنین میزان اصطکاک حلقه‌ها در سرعت‌های پایین بیشتر از سرعت‌های زیاد بوده است که این کاهش حدوداً از سرعت ۳۵۰۰ دور به بعد به میزان ثابتی می‌رسد. دلیل زیاد بودن اصطکاک محاسبه‌شده برای مجموعه حلقه‌ها در سرعت‌های پایین، به خاطر وجود عبارت $(1000/N)$در معادله حاکم بر اصطکاک حلقه‌ها می‌باشد. به‌طور مثال در صورت کمتر شدن سرعت به ۵۰۰ دور حاصل عبارت $(1000/N)$ برابر ۲ می‌شود که این عدد باعث زیادشدن شیب افزایش اصطکاک در سرعت‌های پایین می‌شود. حال اگر سرعت موتور از ۲۰۰۰ دور به ۲۵۰۰ دور افزایش پیدا کند تغییر چندانی در حاصل عبارت $(1000/N)$ ایجاد نشده و به همین دلیل با افزایش سرعت موتور شیب کاهش اصطکاک تقریباً مقدار ثابتی پیدا می‌کند. همچنین نزدیکی نتایج آزمون تجربی با محاسباتی بدون در نظر گرفتن فشار گاز، حاکی از عدم تأثیر فشار هوای بالای سمبه در اصطکاک در حالت موتورگردانی دارد. فشار هوا به خاطر حرکت رفت و برگشتی سمبه تولید می‌شود که نسبت به فشار احتراق بسیار کمتر می‌باشد که نتایج نشان داد که به‌درستی از آن چشم‌پوشی شده است.

در ادامه این تحقیق تلاش بر این شد تا ضرایب روابط موجود در کتاب فرگوسن مربوط به حلقه و دامن سمبه (C_{pr} ,C_{ps}) را برای دماهای مختلف روغن، به دست بیاوریم. با توجه به نزدیکی نتایج برای دمای ۹۰ درجه سانتی‌گراد با تغییر در ضرایب روابط مربوط به محاسبه اصطکاک مجموعه حلقه و سمبه می‌توان این ضرایب را برای دماهای ۳۵ و ۶۰ درجه سانتی‌گراد نیز محاسبه نمود. برای به دست آوردن این ضرایب در دمای ۳۵ درجه سانتی‌گراد و دماهای دیگر، مقدار این ضرایب آن‌قدر تغییر داده شد تا نتایج حاصل از آزمون تجربی با نتایج محاسبات بر اساس روابط حاکم بر اصطکاک حلقه و سمبه، باهم به بهترین تطابق برسند. همچنین برای دمای ۹۰ درجه این ضرایب برای آزمون‌های انجام‌شده بسط داده‌شده است. شکل ۶ فشار مؤثر متوسط اصطکاکی را با ضرایب بسط داده‌شده برای دمای ۹۰ درجه سانتی‌گراد نشان می‌دهد.



شکل ۶: مقایسه آزمون تجربی با نتایج حاصل از محاسبه اصطکاک با ضرایب C_{ps} و C_{pr} تعیین‌شده برای دمای ۹۰ درجه سانتی‌گراد

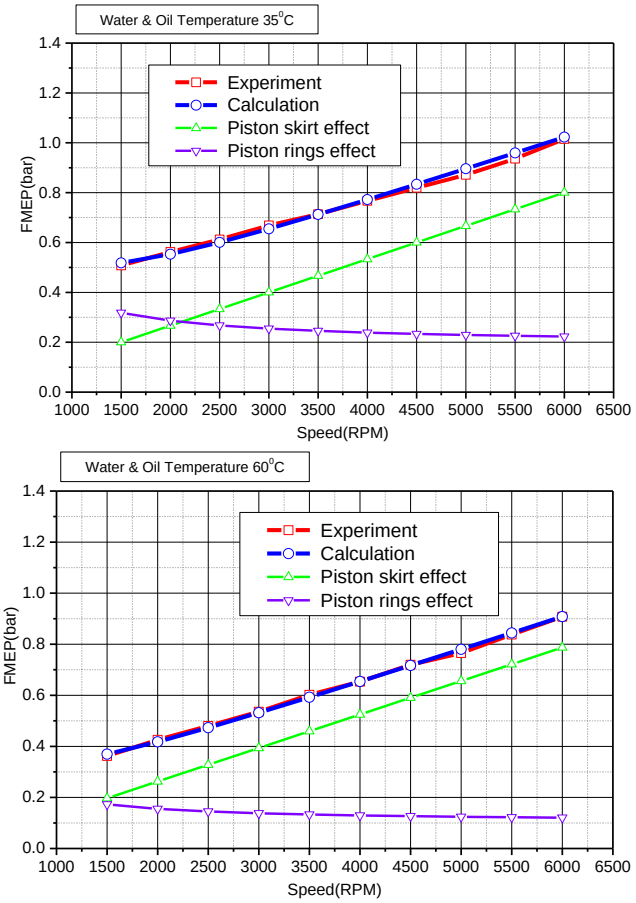
جدول ۱ مقدار به‌دست‌آمده برای ضرایب C_{ps} و C_{pr} را در دماهای مختلف نشان می‌دهد.

جدول ۰۱: ضرایب C_{ps} و C_{pr} در دماهای مختلف

دمای آب و روغن (درجه سانتی‌گراد)	C_{ps} ضریب مربوط به محاسبه اصطکاک دامن سمبه (kPa-mm/s)	C_{pr} ضریب مربوط به رابطه اصطکاک حلقه (kPa-mm2)
۳۵	۳۷۰	۱۱۸۰۰۰
۶۰	۳۶۴	۶۴۰۰۰
۹۰	۳۳۰	۳۷۰۰۰

با توجه به ضرایب C_{ps} و C_{pr} به‌دست‌آمده، نمودارهای مقایسه‌ای بین اصطکاک محاسباتی با ضرایب به‌دست‌آمده در مقایسه با اصطکاک حاصل از آزمون تجربی دقت نتایج را بهتر نشان می دهد.

شکل ۷ مقایسه آزمون تجربی با نتایج حاصل از محاسبه اصطکاک با توجه به معادلات نیمه تجربی حاکم بر مجموعه سمبه و حلقه را با ضرایب C_{ps} و C_{pr} عنوان‌شده در جدول۱، اصطکاک سمبه و حلقه به‌صورت جداگانه برای دمای ۳۵ و ۶۰ درجه سانتی‌گراد نشان می‌دهد.



شکل ۷: مقایسه آزمون تجربی با نتایج حاصل از محاسبه اصطکاک با ضرایب C_{ps} و C_{pr} تعیین‌شده برای دمای ۳۵ و درجه سانتی‌گراد

با توجه به نتایج معادلات نیمه تجربی حاکم بر اصطکاک می‌توان نتیجه گرفت که اثر اصطکاک ناشی از دامن سمبه بیشتر از اصطکاک ناشی از حلقه‌های سمبه می‌باشد.

همچنین نتایج حاکی از آن است که اثر ضریب مربوط به اصطکاک حلقه در دمای ۳۵ درجه سانتی‌گراد نسبت به دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد تأثیر بیشتری دارد. این در حالی است که کاهش دما تأثیری در اصطکاک مربوط به دامن سمبه ندارد. همان‌طور که در قبل نیز گفته شد، احتمالاً عدم تأثیر دما در کاهش اصطکاک دامن سمبه به این دلیل است که باوجود پایین بودن دما در راهگاه روغن، دمای روغن بین سطوح تماسی دامن با استوانه به‌صورت موضعی و تحت تأثیر حرکت بین سطوح بالا رفته و اصطکاک یکسان تولید می‌کند. دلیل نرخ افزایشی اصطکاک سمبه و نرخ کاهشی مجموعه حلقه مربوط به رژیم روانکاری این دو قطعه است. رژیم روانکاری بین سمبه و استوانه از نوع روانکاری هیدرودینامیک[1] بوده است به همین دلیل با افزایش سرعت حرکت سمبه میزان تنش برشی در سیال بین سمبه و استوانه تحت تأثیر افزایش سرعت آن بالا رفته و درنتیجه موجب افزایش اصطکاک این مجموعه شده است. رژیم روانکاری بین حلقه و استوانه از نوع روانکاری مرزی[2] بوده که در این نوع رژیم روانکاری چون لایه روغن مناسبی بین حلقه و استوانه شکل نمی‌گیرد، تابع روابط سیالاتی بین این دو قطعه نبوده و با افزایش سرعت تحت تأثیر نیروی اینرسی مقدار اصطکاک کاهش می‌یابد.

نتیجه‌گیری

همان‌طور که نتایج آزمون‌ها نشان می‌دهد با تغییر گرانروی روغن از 10W40 به 20W50 اصطکاک موتور افزایش می‌یابد که این افزایش در دماهای کم تأثیر بیشتری دارد و در دماهای بیشتر از ۹۰ درجه سانتی‌گراد بسیار کمتر می‌شود. این نتایج حاکی از آن است که برای سیکل‌های آلایندگی NEDC که موتور در ابتدای کارکرد در دماهای سرد کار می‌کنند، انتخاب روغن با گرانروی کمتر تأثیر بسزای در مصرف سوخت موتور دارد. این در شرایطی است که اگر موتور در دماهای گرم‌تر کار می‌کند و کاربری خاصی دارد (مثلاً موتورهای لوکوموتیو) انتخاب روغن با گرانروی بیشتر تأثیر زیادی روی اصطکاک ندارد. دلیل اختلاف کم اصطکاک موتور با دو نوع روغن 20W50 نسبت به 10W40 در دماهای بیشتر نسبت به دماهای پایین، به نرخ کاهش گرانروی دو نوع روغن با افزایش دما برمی‌گردد که با افزایش دما نرخ کاهش گرانروی برای هر دو نوع روغن به یک نقطه نزدیک می‌شود.

همچنین نتایج آزمون در دورهای بالا نشان می‌دهد که به علت بالا رفتن دمای موضعی بین سمبه و حلقه با استوانه در سرعت‌های بالا حتی در دماهای روغن پایین در گالری اصلی روغن، میزان اثر گرانروی

1 - Hydrodynamic Lubrication

2 - Boundary Lubrication

روغن کمتر از دورهای پایینی می‌شود. با افزایش سرعت، دما به‌صورت موضعی در ناحیهٔ سمبه و حلقه افزایش می‌یابد. در این تحقیق، دمای روغن در منطقهٔ مسیر اصلی روغن در بلوک موتور کنترل‌شده است، بنابراین کنترلی روی دمای موضعی نیست. افزایش دمای موضعی، با توجه به نمودار تغییر لزجت روغن با دما، سبب نزدیک شدن لزجت هر دو روغن شده و درنتیجه تأثیر نوع روغن بر اصطکاک را کاهش می‌دهد. نتایج حاصل از معادلات نیمه تجربی حاکم بر اصطکاک سامانه سمبه و حلقه نشان می‌دهد که دلیل نرخ افزایشی اصطکاک سمبه و نرخ کاهشی مجموعه حلقه، مربوط به رژیم روان کاری این دو قطعه است. رژیم روان کاری بین سمبه و استوانه از نوع روان کاری هیدرودینامیک بوده و رژیم روان کاری بین حلقه و استوانه رژیم روان کاری مرزی بوده است به‌طوری‌که اصطکاک دامن سمبه با افزایش دور زیاد می‌شود اما اصطکاک حاصل از حلقه‌ها با افزایش دور کم می‌شود. همچنین با ارائه ضرایب معادلات نیمه تجربی برای دماهای پایین امکان محاسبه اصطکاک در این دماها با تغییر پارامترهای هندسی سمبه و حلقه امکان‌پذیر است.

تشکر و قدردانی

نویسندگان این مقاله، از شرکت تحقیق، طراحی و تولید موتور ایران‌خودرو (ایپکو)، به جهت حمایت مالی از این تحقیق، قدردانی می‌نماید. ضمناً از آقای مهندس سلطانی و همچنین از کارکنان آزمایشگاه موتور ایپکو نیز، تشکر می‌شود.

فهرست علائم

DO_{FMEP}	درصد اختلاف اصطکاک ناشی از تغییر روغن
FMEP	فشار مؤثر متوسط اصطکاکی (bar)
$Fmep_{skirt}$	فشار مؤثر متوسط اصطکاکی دامن سمبه (bar)
C_{ps}	ثابت پیشنهادی پاتون[1] 294 kPa-mm/s
$\bar{U}p$	سرعت متوسط سمبه (m/s)
b	قطر سمبه (mm)
$Fmep_{rings}$	فشار مؤثر متوسط اصطکاکی حلقه سمبه (bar)
C_{pr}	ثابت پیشنهادی پاتون $4.06^{\times}104$ kPa-mm2
N	سرعت موتور (rpm)

مراجع

[1] Ferguson, Colin R. and Allan T. Kirkpatrick. Internal combustion engines: applied thermo sciences. John Wiley & Sons 2015.

[2] Truhan, John J. Jun Qu, and Peter J. Blau. "The effect of lubricating oil condition on the friction and wear of piston ring and cylinder liner materials in a reciprocating bench test". Wear 259.7 (2005): 1048-1055.

[3] Gore, Michael, et al. "Direct measurement of piston friction of internal-combustion engines using the floating-liner principle." Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering 228.3 (2014): 344-354.

[4] Report of Development of the 1.7l Bi-Fuel Engine. Report of Friction Measurements. Test No.: 12686-0100SD-019.

[1] Patton

The Journal of Engine Research

Journal Homepage: www.engineresearch.ir

Effect of oil viscosity on rings and pistons friction using experimental tests and semi-empirical equations in the motoring mode

M. Mehrabbi Vaghar[1], M. A. Ehteram[2*]

[1]*Irankhodro Powertrain Company (IPCo), Tehran, Iran, m_mehrabi@ip-co.com*
[2]*Faculty of Mechanical Engineering and Energy, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran, m_ehteram@sbu.ac.ir*
[*]*Corresponding Author*

ARTICLE INFO

Article history:
Received: 22 December 2017
Accepted: 21 February 2018

Keywords:
Friction
Piston
Ring
Viscosity

ABSTRACT

One of the most important issues affecting engine efficiency is the internal friction of the engine. One of the important factors in the friction of the engine is the type of oil and its viscosity. In this paper, we tried to measure the amount of friction of the ring and pistons by the motoring method with two kinds of 10W40 and 20W50 oils with different viscosities and at temperatures of 35, 60 and 90 °C. In the next step, the semi-empirical equations for friction were compared with the results of the experimental validation tests for 90 °C. In the final step, the coefficients of the semi-empirical correlations were confirmed for other temperatures. The experimental results showed the significant effect of the viscosity at 35°C and 60 °C on the friction while its effect was negligible at 90°C. Also, the results of semi-empirical equations revealed that the friction contribution of the piston skirt was greater than the friction of the rings, and also the friction of the piston skirt increases with increasing speed.

© Iranian Society of Engine (ISE), all rights reserved.