

بررسی رفتگی الکترودهای شمع و تأثیر آن بر ولتاژ مورد نیاز جرقه و عملکرد در یک موتور پایه گازسوز

سعید جوان

دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس
S.javan@modares.ac.ir

فتح اله امی*

دانشیار دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس
fommi@modares.ac.ir

سید وحید حسینی

دانشجوی دکتری مهندسی مکانیک، شرکت تحقیق، طراحی و تولید موتور ایران خودرو
V_hosseini@ip-co.com

سید شهاب الدین علویون

کارشناس ارشد، شرکت تحقیق، طراحی و تولید موتور ایران خودرو
Sh_alaviyoun@ip-co.com

* نویسنده مسئول تاریخ دریافت: ۹۰/۰۴/۰۸ پذیرش نهایی مقاله: ۹۰/۰۶/۳۰

چکیده

در این تحقیق ابتدا تأثیر هندسه الکترودها بر ولتاژ مورد نیاز جرقه و عملکرد یک موتور پایه گازسوز، با استفاده از سه نوع شمع که دارای هندسه متفاوت الکترودها و وضعیت حرارتی یکسان می‌باشند، مورد بررسی قرار می‌گیرد؛ سپس با انجام آزمون‌های دوام موتوری، وضعیت دوام شمع‌ها بررسی می‌شود. جهت بررسی ساز و کارهای رفتگی الکترودها، از روش سطح‌نگاری با کمک میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) استفاده شده است؛ همچنین جهت بررسی وضعیت جرقه‌زنی شمع‌ها از آزمون قطعه‌ای شمع بهره برده شده است. نهایتاً با انجام آزمون‌های احتراقی، تأثیر رفتگی الکترودها بر ولتاژ مورد نیاز جرقه، عملکرد و مصرف سوخت موتور مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. بر اساس نتایج به دست آمده برای شمع‌های نو، استفاده از شمعی که در الکترودهای منفی خود شیار دارد، سبب کاهش ۲۱ درصدی بیشینه ولتاژ مورد نیاز می‌شود. بر اساس نتایج آزمون‌های دوام، پس از ۲۰۰ ساعت کارکرد، میانگین افزایش دهانه برای الکترودهای پایه نیکل، ۷ برابر بیشتر از الکترودهای پلاتینی است. بررسی سطح الکترودها به کمک SEM، ترک‌ها و حفره‌های زیادی را در سطح الکترودهای پایه نیکل نشان می‌دهد. ایجاد و رشد ترک‌ها و نفوذ اکسید کلسیم می‌تواند سبب افزایش نرخ رفتگی در الکترودهای پایه نیکل شود. بر اساس نتایج آزمون احتراقی، در صورت تأمین ولتاژ مورد نیاز جرقه توسط سیم‌پیچ افروزش، رفتگی الکترودها تأثیر قابل ملاحظه‌ای در میزان گشتاور و مصرف سوخت ویژه موتور در هنگام کارکرد با سوخت گاز طبیعی ندارد.

امروزی ضمن حفظ این محدودیت‌های آلاینده‌گی، عملکرد مطلوبی داشته باشند. شمع یکی از اجزای موتور است که وظیفه محترق نمودن مخلوط هوا و سوخت را بر عهده دارد. شمع باید توانایی محترق نمودن مخلوط هوا و سوخت را در چرخه‌های متوالی و تحت شرایط مختلف کارکرد موتور داشته باشد و احتراق پایداری در محفظه احتراق ایجاد نماید، به طوری که تغییرات فشار در محفظه احتراق در چرخه‌های مختلف کم باشد. اگر کیفیت عملکرد شمع افت پیدا کند و احتراق کاملی در موتور ایجاد نشود، عملکرد موتور افت پیدا کرده و همچنین آلاینده‌گی افزایش می‌یابد [۱]. عملکرد مناسب شمع، به طراحی و عملکرد صحیح اجزای مختلف آن و

کلید واژه‌ها: شمع، رفتگی الکترودها، آزمون دوام، ولتاژ مورد نیاز جرقه، عملکرد موتور

۱- مقدمه

با توجه به محدود بودن منابع سوخت‌های فسیلی و افزایش قیمت جهانی سوخت، تقاضا برای موتورهای کم مصرف افزایش پیدا کرده است و طراحان موتور تمایل دارند تا موتورهایی کوچک، با بازدهی بالا تولید کنند. از طرفی قوانین زیست‌محیطی سختگیرانه‌ای برای آلاینده‌های خروجی از موتورهای احتراق داخلی وضع شده است. لذا نیاز است تا موتورهای

باید الکتروود مرکزی از موادی با نقطه ذوب بالا ساخته شود و در ساخت الکتروود منفی از مواد مقاوم به اکسایش استفاده گردد [۴ و ۷]. در ساخت شمع‌های معمولی، از نیکل استفاده می‌شود که نقطه ذوب بالایی دارد و برای افزایش مقاومت در برابر اکسایش به نیکل، آلومینیوم، ایتیریم و کروم اضافه می‌کنند [۷]. برای مقابله با رفتگی الکتروودها و افزایش عمر مفید شمع، می‌توان از فلزات گرانبها مانند نقره، ایریدیم و پلاتین استفاده کرد [۴] در محدوده دمایی ۲۰۰ تا ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد، نرخ رفتگی الکتروودهای نیکلی، وابستگی زیادی به دما دارد و با افزایش دما افزایش می‌یابد. در حالی که در این محدوده دمایی، نرخ رفتگی الکتروودهای پلاتینی بسیار کمتر است [۱۲].

طبق آنچه مطرح شد، قرار گرفتن شمع در شرایط محفظه احتراق سبب رفتگی مواد از الکتروودها و افزایش اندازه دهانه شمع می‌شود. با افزایش دهانه شمع، ولتاژ مورد نیاز جرّقه نیز افزایش می‌یابد و اگر سامانه جرّقه توانایی تأمین ولتاژ را نداشته باشد، احتراق ناپایدار^۵ صورت گرفته و عملکرد موتور افت پیدا می‌کند. با توجه به محدود بودن ولتاژ قابل تأمین توسط سیم‌پیچ افروزش، ولتاژ مورد نیاز جرّقه یکی از عوامل اصلی در تعیین عمر مفید شمع است. اختلاف بین بیشینه ولتاژ قابل تأمین توسط سیم‌پیچ افروزش و ولتاژ مورد نیاز برای جرّقه، ذخیره ولتاژ^۶ نامیده می‌شود و جهت عملکرد مطلوب شمع نیاز است تا ذخیره ولتاژ حدود ۵ کیلو ولت باشد [۱۳]. علاوه بر ذخیره ولتاژ باید به نکته مهم دیگری نیز توجه کرد: افزایش رفتگی الکتروودها منجر به کاهش شدت میدان الکتریکی در دهانه شمع می‌شود و از طرفی رسوب گرفتگی سطح عایق سبب کاهش مقاوت الکتریکی بین الکتروود مرکزی و بدنه شمع می‌شود. در نتیجه ممکن است جرّقه به جای اینکه در دهانه شمع زده شود در مسیر نادرست و بین الکتروود مرکزی و بدنه زده شود [۱۱]. این پدیده، جرّقه جانبی^۷ نامیده می‌شود و سبب افت عملکرد موتور می‌گردد. رفتگی شمع در هر موتور متفاوت است زیرا دما و فشار محفظه احتراق موتورهای مختلف با یکدیگر متفاوت است، همچنین نوع سوخت مورد استفاده نیز (با توجه به تغییر دمای محفظه احتراق) می‌تواند در میزان رفتگی موثر باشد [۱۴].

اغلب تحقیقات انجام شده در مورد شمع، بر روی موتورهای بنزینی صورت گرفته است و غیر از مواردی مانند بررسی سازکارهای رفتگی شمع [۱۵] و تأثیر انرژی الکتریکی در عمر مفید شمع موتورهای گازسوز [۱۶]، در مورد عملکرد شمع در موتورهای دوسوختی که از بنزین و گاز

همچنین عملکرد سامانه جرّقه بستگی دارد. برای احتراق مطمئن مخلوط آشفته هوا و سوخت، بهتر است که تا حد امکان دهانه شمع افزایش یابد اما یکی از محدودیت‌ها، قابلیت تأمین ولتاژ توسط سامانه جرّقه است [۲ و ۳]. استفاده از الکتروودهای ظریف و کاهش سطح تماس بین شعله اولیه و الکتروودها، یکی دیگر از روش‌های افزایش توانایی‌های شمع است که منجر به افزایش قابلیت احتراق و در نهایت، بهبود عملکرد موتور می‌گردد [۴-۶]. با افزایش قابلیت احتراق، مصرف سوخت و آلاینده‌های خروجی نیز کاهش می‌یابد [۷ و ۸]. علاوه بر مزایای مذکور، استفاده از الکتروود ظریف سبب تقویت شدت میدان الکتریکی در دهانه شمع و کاهش ولتاژ مورد نیاز جرّقه نیز می‌گردد [۵ و ۹]. اما یکی از محدودیت‌ها در استفاده از الکتروودهای ظریف، تمرکز انرژی در نوک الکتروودها و افزایش رفتگی^۱ الکتروودها می‌باشد.

از طرفی در سال‌های اخیر، برای رسیدن به بازده حرارتی بیشتر، نسبت تراکم موتورهای افزایش یافته است. در نتیجه تنش و بار حرارتی بیشتری به شمع وارد می‌شود [۱۰]. طراحی شمع باید به گونه‌ای باشد که در فشارهای زیاد هم به درستی عمل کند و جرّقه در مسیر صحیح زده شود. زیرا انحراف جرّقه سبب افت عملکرد و افزایش نوسانات احتراق خواهد شد [۱۱]. با توجه به افزایش بارهای حرارتی، باید مقاومت الکتروودهای شمع نسبت به خوردگی و رفتگی افزایش یابد.

بررسی رفتگی الکتروودها در محفظه احتراق و مقایسه آن با رفتگی در محیط بدون احتراق نشان می‌دهد که به طور کلی، دو ساز و کار^۲ اصلی در کاهش مواد از سطح الکتروودها وجود دارد. رفتگی ناشی از جرّقه و رفتگی ناشی از اکسایش^۳ [۴، ۵ و ۷]. راجر^۴ و همکارانش رفتگی الکتروودها را در محیط‌های اکسیژن و نیتروژن در فشار ۷ بار را مورد بررسی قرار داده و نشان دادند که اکسایش، ساز و کار غالب در رفتگی مواد از سطح الکتروودها است. احتراق مخلوط هوا و سوخت سبب افزایش دمای الکتروودها می‌شود و اکسیژن موجود در محیط در سطح الکتروودها نفوذ می‌کند. نفوذ اکسیژن سبب سست شدن پیوندها در سطح الکتروود شده و در اثر جریان مخلوط و فشار داخل محفظه احتراق، لایه اکسید از سطح الکتروود جدا می‌شود [۵]. رفتگی ناشی از جرّقه در اثر برخورد یون‌ها با سطح الکتروودها اتفاق می‌افتد. یون‌ها دارای انرژی زیادی هستند و سبب کنده شدن اتم‌ها از سطح الکتروودها می‌شوند [۴، ۵ و ۷].

با توجه به عوامل ذکر شده، برای جلوگیری از رفتگی الکتروودها،

۵- Misfire

۶- Voltage reserve

۷- Side spark

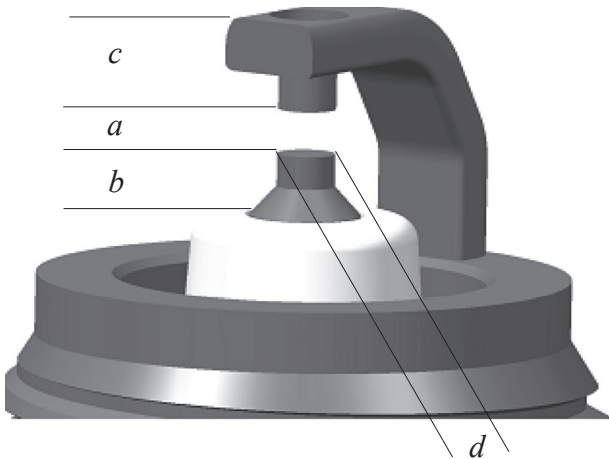
۱- Wear

۲- Mechanism

۳- Oxidation Wear

۴- Rajer

دوام مقایسه شود. در شکل ۲، اندازه‌های مذکور روی شمع نشان داده شده‌اند. از دستگاه بازتاب نور^۱ نیز جهت بررسی رفتگی الکترودها استفاده شد. به منظور بررسی بهتر میزان و نحوه رفتگی شمع‌ها پس از آزمون، به کمک دستگاه بازتاب نور، از تمامی شمع‌ها قبل از آزمون عکس تهیه شد تا با عکس‌های بعد از آزمون مقایسه شود.



شکل ۲ (a) دهانه شمع (b) طول الکتروود مرکزی (c) ضخامت الکتروود منفی (d) قطر الکتروود مرکزی

طبیعی استفاده می‌کنند، اطلاعات چندانی منتشر نشده است. این در حالی است که، عموماً موتورهای اشتعال جرقه‌ای گاز سوز نسبت به موتورهای بنزینی شرایط سخت‌تری را برای شمع به وجود می‌آورند و انرژی بیشتری برای احتراق مخلوط هوا و گاز طبیعی نیاز است. لذا با توجه به اینکه گاز طبیعی یکی از منابع پر مصرف سوختی در موتورهای اشتعال جرقه‌ای در ایران می‌باشد، نیاز است تا تحقیقی جامع در مورد عملکرد شمع‌ها در شرایط کارکرد موتور با سوخت گاز طبیعی انجام شود.

۲- تجهیزات آزمایشگاهی و روش اجرای آزمون

در انجام آزمون‌ها از ۳ نوع شمع متفاوت استفاده شد. شکل دهانه همه شمع‌ها به صورت J بوده و تفاوت آنها در طراحی و اندازه الکترودها است. در شکل ۱، شمع‌های مورد استفاده در آزمون نشان داده شده است. شمع نوع اول یک شمع با شکل دهانه معمولی است که جنس هر دو الکتروود آن از آلیاژ نیکل - آلومینیوم است. شمع نوع دوم دارای الکتروود مثبت ظریف و الکتروود منفی با یک برآمدگی کوچک است. در ساخت الکتروودهای این شمع علاوه بر نیکل از پلاتین نیز استفاده شده است. شمع نوع سوم نیز شمعی معمولی است که در ساخت الکتروودهای آن از آلیاژ نیکل - ایتیریم استفاده شده است. الکتروود منفی در این شمع دارای یک شیار است. تمام شمع‌های مورد استفاده در آزمون‌ها از نظر انتقال حرارت، جزء شمع‌های نیمه گرم هستند.



شکل ۱ شمع‌های مورد استفاده در آزمون

در جدول ۱، تعداد هر نوع از شمع‌ها و میانگین اندازه‌های مربوط به آنها آورده شده است. الکتروود منفی در شمع نوع دوم دارای دو بخش است: پایه و برآمدگی. لذا ضخامت این دو بخش، به صورت مجزا در

۱- Profile projection

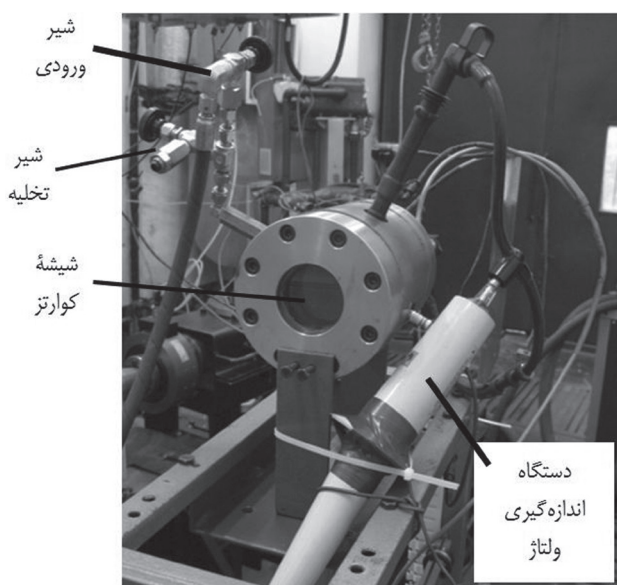
بعد از شماره‌گذاری و دسته‌بندی، شمع‌ها اندازه‌گیری شدند. مقادیر اندازه دهانه، قطر الکتروود مرکزی، طول الکتروود مرکزی و ضخامت الکتروود منفی اندازه‌گیری شد تا با اندازه‌های بعد از طی کردن آزمون

جدول آورده شده است.

جدول ۱ اندازه‌های شمع‌های مورد استفاده در آزمون

نوع شمع	۱	۲	۳
تعداد	۱۶	۱۶	۱۶
اندازه دهانه	۰/۷۵	۰/۷۵	۰/۷۵
قطر الکتروود مرکزی	۲/۹۷	۰/۶۲	۲/۶۲
طول الکتروود مرکزی	۱/۴۵	۲/۰۴	۱/۵۱
ضخامت الکتروود منفی	۱/۲۵	۱/۱ + ۰/۱۹	۱/۲۱

فشارهای مختلف به وجود می‌آورد. فشار محفظه بر اساس شرایط بحرانی موتور - شرایطی که ولتاژ مورد نیاز جرّقه بیشترین مقدار خود را دارد- تنظیم می‌شود. در موتور مورد آزمون، ولتاژ مورد نیاز در فشار ۸ بار داخل محفظه، معادل شرایطی است که ولتاژ مورد نیاز در موتور بیشترین مقدار خود را دارد. در شکل ۳، دستگاه آزمون شمع و نحوه اندازه‌گیری ولتاژ در این دستگاه نشان داده شده است. در این تحقیق، وضعیت جرّقه‌زنی و ولتاژ مورد نیاز جرّقه برای تمامی شمع‌های نو و کارکرده (مورد استفاده در آزمون دوام) توسط این دستگاه، مورد آزمون قرار گرفت.



شکل ۳ دستگاه آزمون شمع و تجهیزات اندازه‌گیری ولتاژ

پس از اندازه‌گیری شمع‌ها و عکس‌برداری از تمام آنها، شمع‌ها در آزمون دوام گذرای^۱ استاندارد^۲ مورد استفاده قرار گرفتند. بیشتر شمع‌ها ۲۰۰ ساعت آزمون دوام را طی کردند و برای بررسی تأثیر ساعت کارکرد بر رفتگی، برخی از شمع‌ها ۵۰ ساعت و ۱۰۰ ساعت مورد آزمون قرار گرفتند. آزمون دوام با استفاده از سوخت گاز طبیعی انجام شده است. آزمایش‌ها در اتاق‌های آزمون موتوری شرکت تحقیق، طراحی و تولید موتور ایران خودرو که مجهز به لگام ترمز^۳ هستند، انجام شد. در انجام آزمایش‌ها از یک موتور اشتعال جرّقه‌ای پایه گازسوز استفاده شده است که موتوری با ۴ استوانه و آرایش خطی و تنفس طبیعی^۴ می‌باشد. در جدول ۲، مشخصات فنی این موتور آورده شده است.

جدول ۲ مشخصات فنی موتور مورد استفاده در آزمون

مشخصه	مقدار	واحد
قطر استوانه	۷۸/۶	میلی متر
طول مسیر سمبه	۸۵	میلی متر
حجم جابجایی	۱۶۴۹	سانتی متر مکعب
نسبت تراکم	۱۱/۰۵	---
بیشینه توان	۷۶	کیلو وات
بیشینه گشتاور	۱۳۵	نیوتن متر

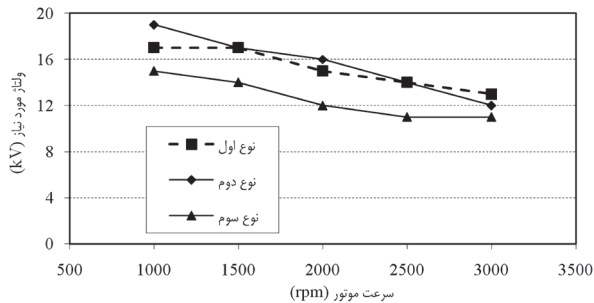
علاوه بر این، جهت بررسی تأثیر رفتگی الکترودها بر عملکرد موتور، آزمون احتراقی بر روی یک موتور مرجع انجام گرفت. در این آزمون از هر نوع شمع، یک دست شمع نو و یک دست با کارکرد حدود ۲۰۰ ساعت مورد آزمون قرار گرفت. در آزمون احتراقی، علاوه بر مشخصه‌های عملکردی موتور، ولتاژ مورد نیاز جرّقه، فشار داخل استوانه و مصرف سوخت موتور نیز اندازه‌گیری شد.

نتایج اندازه‌گیری ولتاژ مورد نیاز جرّقه در دستگاه آزمون شمع نشان می‌دهد که ولتاژ مورد نیاز هر کدام از ۴ شمع استوانه‌های موتور، مقادیر نزدیک به هم دارد. بنابراین با توجه به تکرارپذیری مقادیر ولتاژ، در آزمون‌های احتراقی فقط ولتاژ مورد نیاز جرّقه در استوانه شماره ۲ اندازه‌گیری شد. در شکل ۴، مقادیر اندازه‌گیری شده ولتاژ مورد نیاز جرّقه برای شمع‌های کارکرده در فشار ۸ بار نشان داده شده است.

برای مطالعه و مشاهده وضعیت جرّقه‌زنی و اندازه‌گیری ولتاژ مورد نیاز جرّقه شمع‌ها، یک دستگاه آزمون قطعه‌ای طراحی و ساخته شد. این دستگاه شامل یک حجم کنترل مشخص است و قابلیت مشاهده و بررسی وضعیت جرّقه‌زنی و همچنین اندازه‌گیری ولتاژ مورد نیاز را در

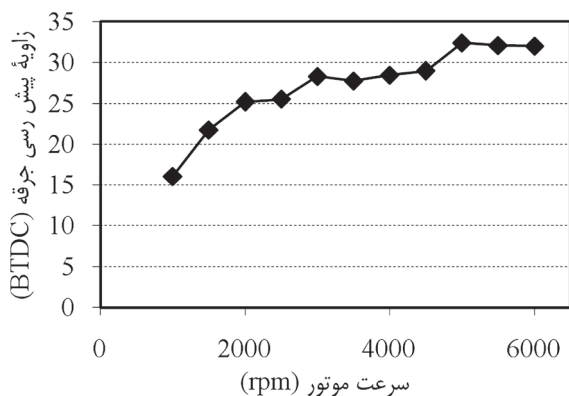
۱- Off road
 ۲- Standard
 ۳- Dynamometer
 ۴- Naturally- aspirated

روند نمودارهای ولتاژ نشان می‌دهد که در هنگام استفاده از سوخت گاز طبیعی، بیشینه ولتاژ مورد نیاز در سرعت ۱۰۰۰ د.د.د رخ می‌دهد و با افزایش سرعت موتور، ولتاژ مورد نیاز کاهش می‌یابد.

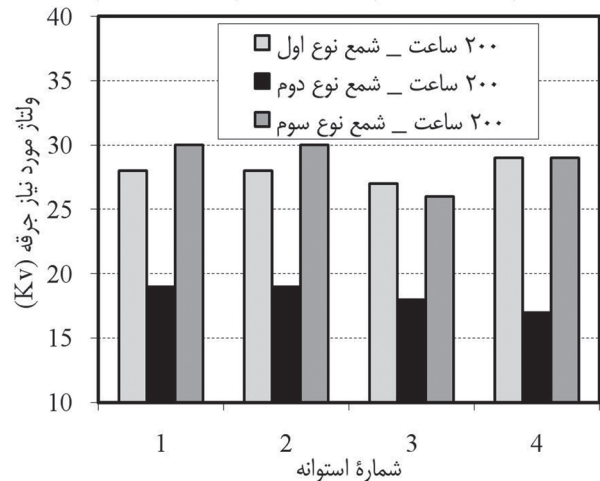


شکل ۶ ولتاژ مورد نیاز برای شمع‌های نو در شرایط بار کامل با استفاده از سوخت گاز طبیعی

در بررسی نتایج باید توجه کرد که ولتاژ مورد نیاز جرّقه به فشار محفظه احتراق و اندازه دهانه شمع بستگی دارد [۳]. یکی از عوامل موثر در میزان فشار محفظه احتراق هنگام جرّقه‌زنی، زاویه پیش‌رسی جرّقه است و هرچه کمتر باشد (نزدیک نقطه مرگ بالا)، فشار در هنگام جرّقه‌زنی افزایش یافته و ولتاژ مورد نیاز افزایش می‌یابد. در شکل ۷، زاویه پیش‌رسی جرّقه در هنگام استفاده از سوخت گاز طبیعی نشان داده شده است. کمترین زاویه پیش‌رسی جرّقه مربوط به سرعت ۱۰۰۰ د.د.د است و با افزایش سرعت به ۱۵۰۰ د.د.د، زاویه پیش‌رسی جرّقه افزایش می‌یابد. افزایش زاویه پیش‌رسی جرّقه سبب می‌شود که فشار محفظه احتراق در هنگام جرّقه‌زنی کمتر باشد و ولتاژ مورد نیاز برای ایجاد جرّقه کاهش یابد.



شکل ۷ زاویه پیش‌رسی جرّقه برای سوخت گاز طبیعی در هنگام کارکرد در شرایط بار کامل موتور



شکل ۴ ولتاژ مورد نیاز جرّقه در فشار ۸ بار در دستگاه آزمون قطعه‌ای شمع

جهت اندازه‌گیری فشار داخل استوانه، بستار سوراخ کاری شده و حسگر فشار نصب گردید. علاوه بر حسگر فشار داخل استوانه، حسگرهای دما و فشار مورد نیاز جهت اندازه‌گیری متغیرهای مختلفی مثل دمای گازهای خروجی، دما و فشار مایع خنک‌کننده، دما و فشار روغن بر روی موتور نصب شد. موتور در یک اتاق آزمون مجهز به دستگاه اندازه‌گیری سوخت مصرفی و لگام ترمز ۲۲۰ کیلوواتی مورد آزمون قرار گرفت. در شکل ۵، اندازه‌گیری ولتاژ موتوری در اتاق آزمون نشان داده شده است.



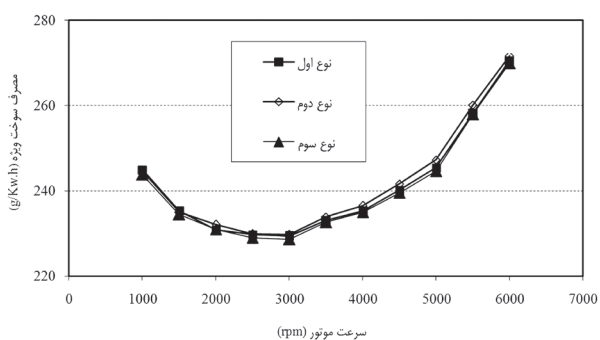
شکل ۵ اندازه‌گیری ولتاژ مورد نیاز جرّقه در اتاق آزمون

۳- نتایج آزمون

۳-۱- تاثیر هندسه الکترودها بر ولتاژ مورد نیاز جرّقه

در شکل ۶ ولتاژ مورد نیاز جرّقه در هنگام استفاده از سوخت گاز طبیعی در شرایط بار کامل موتور نشان داده شده است. شمع نوع سوم کمترین ولتاژ را برای ایجاد جرّقه در مخلوط هوا و گاز طبیعی نیاز دارد و شمع نوع دوم، نسبت به سایر شمع‌ها نیاز به ولتاژ بیشتری دارد. بررسی

مصرف سوخت ویژه برای شمع نوع دوم، مقداری بیشتر از سایرین است و بیشترین اختلاف در سرعت ۵۰۰۰ د.د.د اتفاق می‌افتد که مصرف سوخت برای شمع نوع دوم، ۱/۱ درصد بیشتر از شمع نوع سوم است. در شکل ۹، مصرف سوخت ویژه موتور با استفاده از شمع‌های نو در هنگام کارکرد موتور با سوخت گاز طبیعی نشان داده شده است.



شکل ۹ مصرف سوخت ویژه با استفاده از شمع‌های نو و سوخت گاز طبیعی در شرایط بار کامل

مصرف سوخت ویژه، تحت تاثیر نسبت هم ارزی هوا به سوخت قرار دارد و با غنی‌تر شدن مخلوط افزایش می‌یابد [۱۳]. کارکرد موتور با مخلوط درست هوا و گاز طبیعی ($\lambda = 1$)، سبب شده است تا تفاوت قابل ملاحظه‌ای از نظر مصرف سوخت ویژه بین شمع‌ها وجود نداشته باشد.

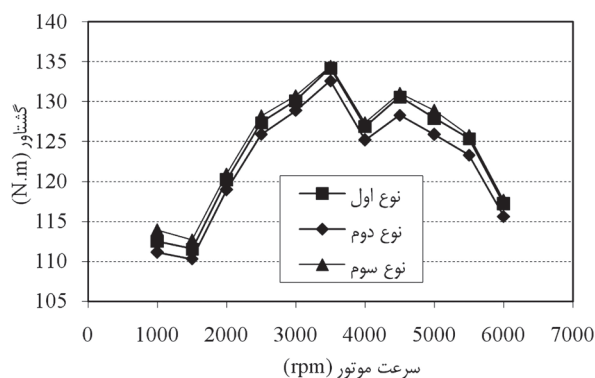
۳-۴- آزمون‌های دوام و رفتگی الکترودها

بررسی ظاهری شمع‌ها پس از آزمون دوام نشان می‌دهد که رفتگی الکترودها در یک شمع یکنواخت نیست. جهت حرکت مخلوط هوا و سوخت، جرقه ایجاد شده را به یک سمت هدایت می‌کند و رشد شعله سبب افزایش رفتگی می‌شود. در شکل‌های ۱۰، ۱۱ و ۱۲، تصویر نمونه‌هایی از شمع‌ها قبل و بعد از آزمون دوام نشان داده شده است. مقایسه تصویر الف و ب در شکل‌های ۱۰ و ۱۲ نشان می‌دهد که در شمع‌های نوع اول و سوم، طول و قطر الکتروود مرکزی و همچنین ضخامت الکتروود منفی کاهش یافته است. لبه‌های تیز الکتروودها در اثر رشد شعله دچار رفتگی شده و نوک الکتروودها گرد شده است. در شکل ۱۱، یکی از شمع‌های نوع دوم قبل و بعد از آزمون دوام نشان داده شده است. رفتگی الکتروودهای شمع نوع دوم بسیار کم بوده است. مشاهده می‌شود که الکتروود مرکزی در این شمع، رفتگی قابل ملاحظه‌ای ندارد و فقط در قسمت نوک، مقداری کاهش مواد وجود دارد. همچنین برآمدگی الکتروود منفی نیز دچار رفتگی مواد نشده است.

در سرعت ۱۰۰۰ د.د.د نسبت به سایر نقاط کاری، ولتاژ بیشتری جهت محترق کردن مخلوط مورد نیاز است و شمع نوع سوم نسبت به شمع نوع دوم، ۲۱ درصد ولتاژ کمتری در این نقطه نیاز دارد. الکتروود منفی در این شمع دارای یک شیار است که لبه‌های این شیار سبب تقویت میدان الکتریکی در دهانه شمع و کاهش ولتاژ مورد نیاز می‌شود. به همین دلیل با وجود اندازه دهانه یکسان، ولتاژ مورد نیاز آن نسبت به سایر شمع‌ها کمتر است.

۳-۲- تاثیر هندسه الکترودها در عملکرد موتور

به منظور بررسی تاثیر هندسه الکترودها در عملکرد موتور، ابتدا عملکرد موتور با استفاده از شمع‌های نو مورد بررسی قرار گرفت. در شکل ۸، گشتاور موتور با استفاده از سوخت گاز طبیعی در شرایط بار کامل نشان داده شده است. شمع نوع سوم بیشترین گشتاور تولیدی را دارد و شمع نوع دوم کمترین مقدار گشتاور را تولید می‌کند. بیشینه گشتاور در سرعت ۳۵۰۰ د.د.د دقیقه به دست می‌آید، شمع نوع سوم در این نقطه کاری حدود ۱/۵ درصد گشتاور بیشتری نسبت به شمع نوع دوم تولید می‌کند. بیشترین اختلاف در سرعت ۴۵۰۰ د.د.د رخ می‌دهد که گشتاور با استفاده از شمع‌های نوع سوم، ۲/۸ نیوتن متر (۲/۱ درصد) بیشتر بوده است.

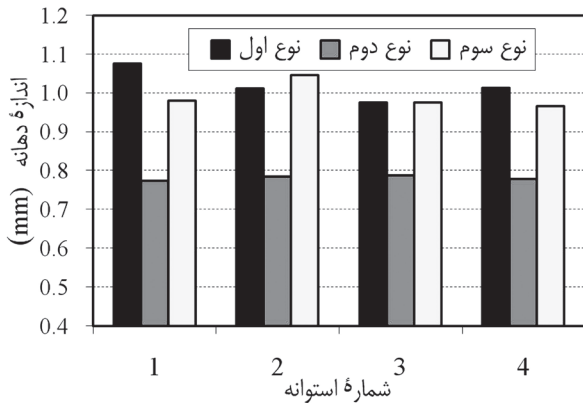


شکل ۸ گشتاور موتور با استفاده از شمع‌های نو و سوخت گاز طبیعی در شرایط بار کامل

۳-۳- مصرف سوخت ویژه

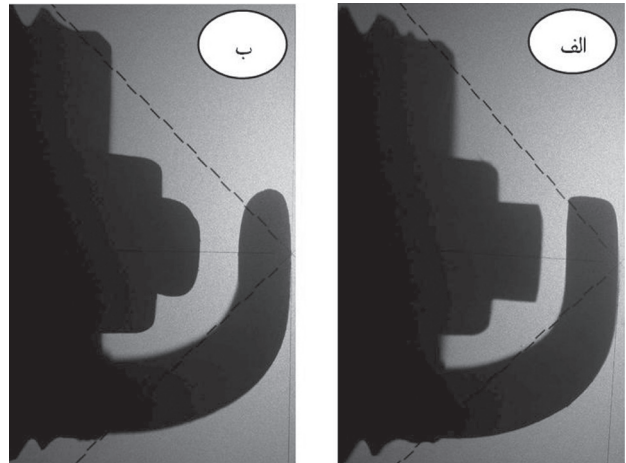
علاوه بر عملکرد موتور، نیاز است تا تاثیر رفتگی شمع در مصرف سوخت نیز بررسی گردد. در هنگام استفاده از گاز طبیعی، بیشینه مقدار مصرف سوخت ویژه در سرعت ۶۰۰۰ د.د.د اتفاق می‌افتد و کمینه مقدار در سرعت ۳۰۰۰ د.د.د به دست می‌آید. برای شمع‌های نو، مصرف سوخت در دوره‌های پایین بسیار نزدیک به هم است و با افزایش دور،

در شکل ۱۳، اندازه دهانه هر نوع از شمعها در تمامی استوانه‌ها بعد از ۲۰۰ ساعت آزمون نشان داده شده است. به علت تفاوت دمای استوانه‌های یک موتور و جهت جریان مخلوط نسبت به الکترودها، رفتگی الکترودها در استوانه‌های مختلف یکسان نیست. اما میزان اختلاف بین شمعها ۰/۰۵ میلی‌متر است و قابل توجه نمی‌باشد.

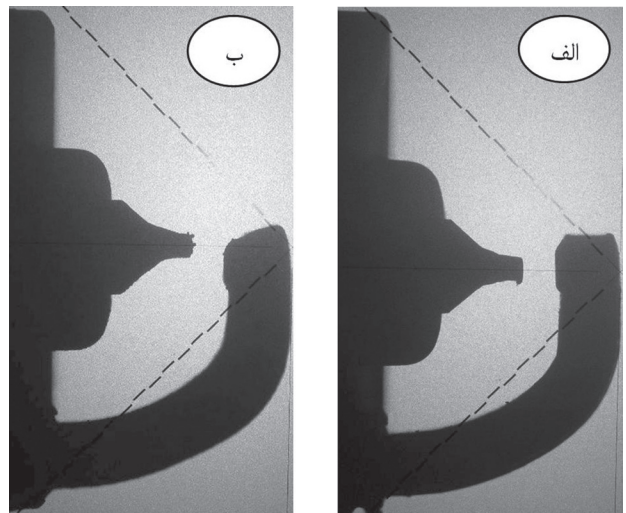


شکل ۱۳ اندازه دهانه شمعها پس از طی کردن ۲۰۰ ساعت آزمون دوام (اندازه اولیه دهانه ۰/۷۵ میلی‌متر می‌باشد)

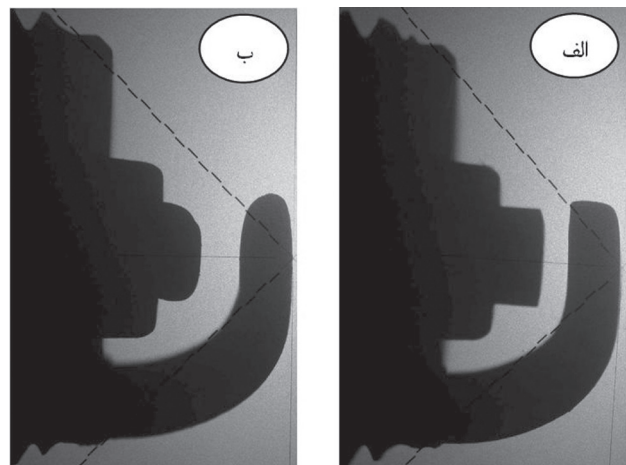
در شکل ۱۴، نرخ افزایش دهانه بر حسب ساعت کارکرد نشان داده شده است. برای شمع نوع دوم نرخ افزایش دهانه به ازای هر یک ساعت کارکرد در آزمون دوام حدود ۰/۱۸ میکرومتر است و با افزایش ساعت کارکرد شمع، نرخ افزایش دهانه افزایش نیافته است. اما میانگین نرخ افزایش دهانه برای شمع نوع اول در ۵۰ ساعت کارکرد، ۰/۵۱ میکرومتر به ازای هر ساعت است و با افزایش ساعت کارکرد به ۰/۲۰۶، این مقدار به ۱/۳۱ میکرومتر می‌رسد. در واقع پس از حدود ۲۰۰ ساعت کارکرد، نرخ افزایش دهانه شمع‌های نوع اول ۷ برابر بیشتر از شمع‌های نوع دوم است. استفاده از پلاتین در ساخت الکترودهای شمع نوع دوم سبب افزایش مقاومت آن در مقابل رفتگی شده است در حالی که در ساخت شمع نوع اول از نیکل و آلومینیوم استفاده شده است که با افزایش ساعت کارکرد میزان اکسایش نیکل افزایش یافته و رفتگی الکترودها سریعتر انجام می‌شود [۱۲]. در الکترودهای شمع نوع سوم از نیکل و ایتیریم استفاده شده است. با توجه به میانگین نرخ رفتگی در این نوع شمع که ۱/۲ میکرومتر به ازای هر ساعت بوده است، استفاده از افزودنی ایتیریم تأثیری مثبتی بر افزایش مقاومت الکترودها نداشته است.



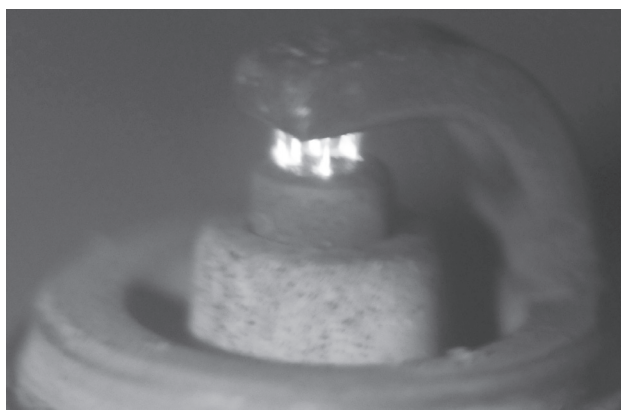
شکل ۱۰ شمع نوع اول الف) قبل از آزمون دوام ب) پس از ۲۰۰ ساعت آزمون دوام (استوانه شماره ۲)



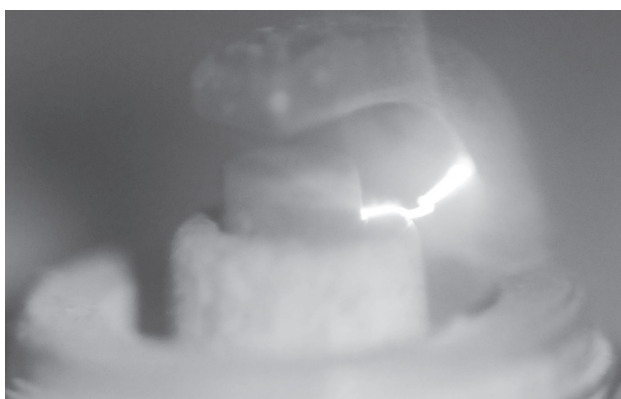
شکل ۱۱ شمع نوع دوم الف) قبل از آزمون دوام ب) پس از ۲۰۰ ساعت آزمون دوام (استوانه شماره ۲)



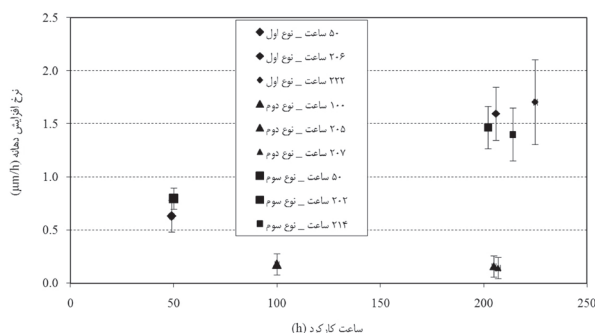
شکل ۱۲ شمع نوع سوم الف) قبل از آزمون دوام ب) پس از ۲۰۰ ساعت آزمون دوام (استوانه شماره ۲)



شکل ۱۵ جرقه در دهانه شمع در فشار ۸ بار



شکل ۱۶ جرقه جانبی در فشار ۸ بار



شکل ۱۴ مقایسه نرخ افزایش دهانه نسبت به ساعت کارکرد در شمع‌های مختلف

۳-۵- آزمون قطعه‌ای شمع

جهت بررسی وضعیت جرقه‌زنی شمع‌ها از دستگاه آزمون قطعه‌ای شمع استفاده شد. وضعیت جرقه‌زنی شمع نوع دوم مطلوب بوده و برای تمامی شمع‌ها جرقه در دهانه زده می‌شود. افزایش ساعت کارکرد نیز تأثیری بر کیفیت جرقه‌زنی نداشته است. استفاده از الکترودهای ظریف در این شمع سبب افزایش شدت میدان الکتریکی در دهانه شمع شده و از انحراف جرقه جلوگیری می‌کند. به طوری که ترک‌های ریز مشاهده شده در نوک عایق نیز نتوانسته سبب نشتی جریان شود. ولتاژ مورد نیاز برای شمع‌های نوع دوم نیز کمتر از سایر شمع‌ها است. مقایسه ولتاژ مورد نیاز در فشار ۸ بار نشان می‌دهد که در بین شمع‌هایی با حدود ۲۰۰ ساعت کارکرد میانگین ولتاژ مورد نیاز برای شمع‌های نوع دوم ۳۷ درصد کمتر از شمع‌های نوع اول و سوم بوده است. در شمع‌های نوع اول با افزایش ساعت کارکرد، ولتاژ مورد نیاز افزایش یافته است. به طوری که میانگین ولتاژ مورد نیاز پس از ۵۰ ساعت کارکرد ۲۴ کیلو ولت بوده که بعد از ۲۰۰ ساعت کارکرد به ۲۸ کیلو ولت رسیده است. اما در شمع‌های نوع دوم ولتاژ مورد نیاز با افزایش ساعت کارکرد از ۱۰۰ به ۲۰۰ افزایش نیافته است.

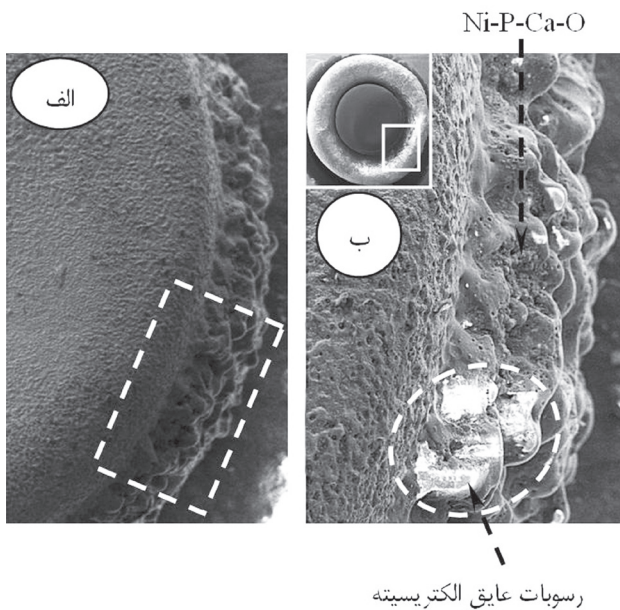
شمع‌های نوع اول و سوم علاوه بر اینکه ولتاژ مورد نیاز بالایی دارند، وضعیت جرقه‌زنی مناسبی نیز ندارند. به طوری که در فشار ۸ بار جرقه منحرف شده و جرقه جانبی بین الکترودهای مرکزی و بدنه شمع زده می‌شود. افزایش دهانه، سبب کاهش شدت میدان الکتریکی در دهانه شمع می‌شود و از طرفی رسوبات کربنی سبب کاهش مقاومت عایق شده است. در نتیجه جرقه جانبی زده می‌شود. انتظار می‌رود که نوسانات احتراق در هنگام استفاده از شمع‌های نوع اول و سوم افزایش یابد. در شکل ۱۵، جرقه صحیح در دهانه شمع و در شکل ۱۶، جرقه جانبی نشان داده شده است.

۳-۶- بررسی سطح الکترودها به کمک میکروسکوپ الکترونی روبشی

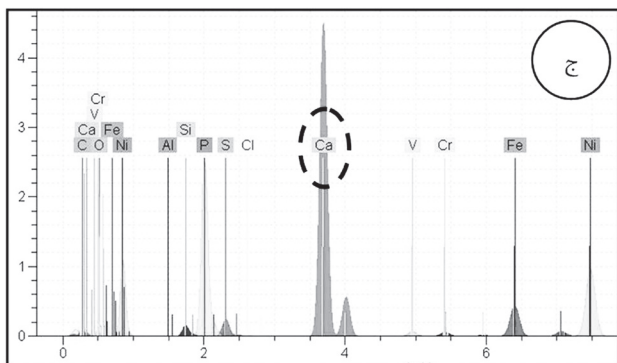
به منظور بررسی بیشتر رفتگی الکترودها و درک بهتر فرآیندهایی که منجر به افزایش رفتگی شمع‌های پایه نیکل شده است، سطح الکترودهای شمع نوع دوم و سوم به کمک SEM^۱ و EDS^۲ مورد بررسی قرار گرفت. برای انجام این مرحله از تحقیق یک نمونه از شمع نوع دوم و یک نمونه از شمع نوع سوم که حدود ۲۰۰ ساعت آزمون را طی کرده اند مورد استفاده قرار گرفت. در شکل ۱۷، سطح الکترودهای مختلف در سطح الکترودهای مرکزی دیده می‌شوند که قطر بزرگترین حفره حدود ۳ میکرومتر است. علاوه بر حفره‌ها، ترک‌های ریزی نیز در سطح الکترودهای مرکزی ایجاد شده است. رشد و به هم پیوستن این ترک‌ها منجر به افزایش رفتگی الکترودهای مرکزی می‌شود. بررسی مواد موجود در این سطح توسط

۱- Scanning Electron microscope

۲- Energy Dispersive x-ray Spectroscopy



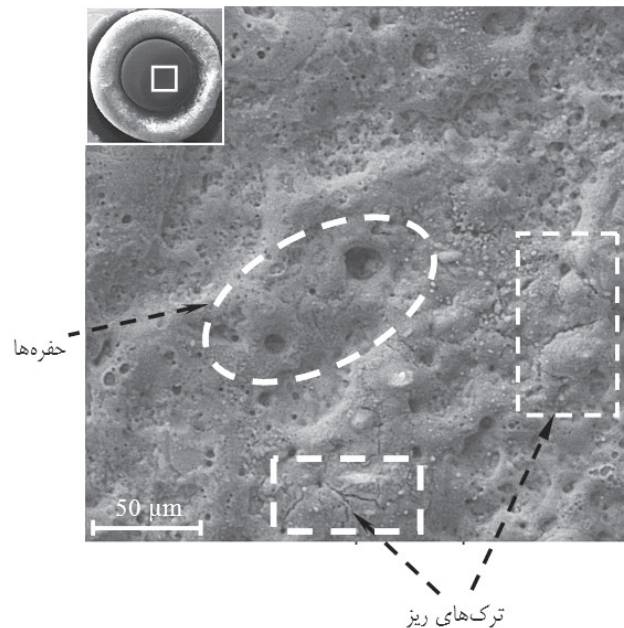
رسوبات عایق الکتریسیته



شکل ۱۸ الف و ب) مواد مذاب و متخلخل ناشی از جرقه جانبی. ج) بررسی مواد موجود در سطح کناری الکترود مرکزی شمع نوع سوم بعد از ۲۰۰ ساعت کارکرد در آزمون دوام (استوانه شماره ۲)

بررسی مواد موجود در سطح نشان می‌دهد که میزان نیکل در قسمت متخلخل بسیار کمتر از سایر نقاط است و میزان کلسیم و فسفر افزایش قابل توجهی یافته است. بررسی مواد رسوب کرده در سطح الکترود مرکزی به کمک EDS نشان دهنده وجود ترکیبات مختلف در سطح الکترود است. نیکل درصد زیادی را به خود اختصاص داده است. الکترودهای این شمع از نوع پایه نیکل هستند لذا وجود درصد بالایی از نیکل طبیعی است. کربن موجود در سطح ناشی از سوخت است زیرا بنزین و گاز طبیعی هر دو سوخت‌های هیدروکربنی هستند. منشأ گوگرد موجود در سطح نیز گوگرد سوخت بنزین است. پتاسیم و فسفر جزء افزودنی‌های مایع خنک‌کننده و روغن هستند و احتمالاً به علت نشت و سوختن محدود بخار روغن بر روی الکترود رسوب کرده‌اند. سلسیسیم

EDS، وجود کلسیم و اکسیژن را نشان می‌دهد. اکسید کلسیم علاوه بر این که سبب افزایش مقاومت الکتریکی دهانه شمع و تضعیف جرقه می‌گردد، می‌تواند سبب تضعیف پیوندها در سطح الکترود شده و نرخ رفتگی الکترود در دماهای بالا را افزایش دهد [۱۶]. زیرا با کنده شدن یک لایه اکسید، مجدداً لایه جدیدی تشکیل شده و عمل کنده شدن لایه‌ها تکرار می‌شود.

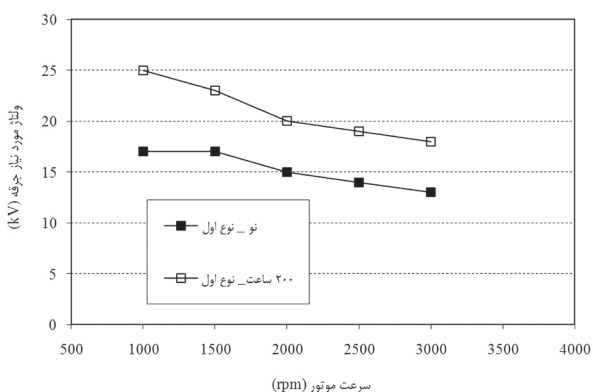


شکل ۱۷ حفرة ها و ترک سطح الکترود مرکزی شمع نوع سوم بعد از ۲۰۰ ساعت کارکرد در آزمون دوام (استوانه شماره ۲)

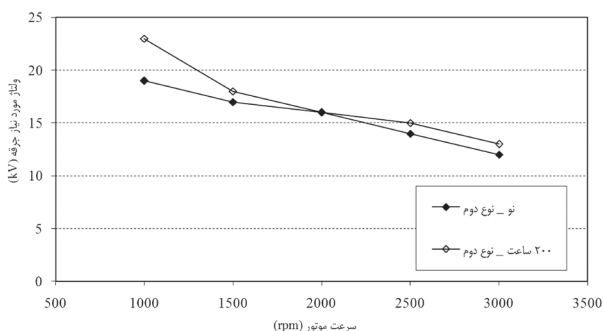
سطح کناری الکترود مرکزی در یک سمت متخلخل و پوشیده از مواد مذاب است و در سمت دیگر نسبتاً هموار به نظر می‌رسد. در شکل ۱۸، سطح کناری سطح الکترود مرکزی نشان داده شده است. با توجه به میزان رفتگی الکترود مرکزی و مواد رسوب کرده بر روی الکترود مرکزی و عایق انتظار می‌رود که جرقه منحرف شده و پدیده جرقه جانبی رخ دهد. سطح متخلخل مشاهده شده در سطح کناری الکترود مرکزی (شکل ۱۸-الف و ۱۸-ب) احتمالاً ناشی از جرقه جانبی بین الکترود مرکزی و عایق است. بررسی مواد موجود در این سطح بیانگر وجود مقادیر زیادی از کلسیم و اکسیژن است (شکل ۱۸-ج) به طوری که این رسوبات سبب افزایش مقاومت الکتریکی الکترود شده‌اند (شکل ۱۸-ب).

۳-۷- بررسی تأثیر شمع کار کرده بر ولتاژ مورد نیاز

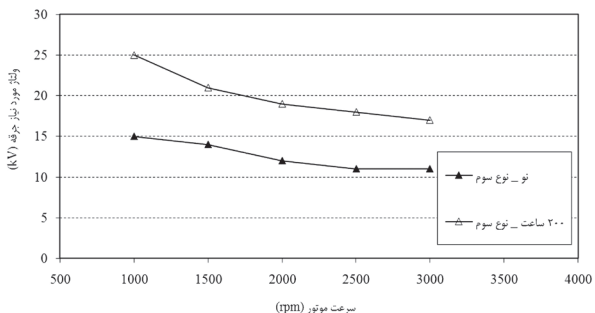
در شکل‌های ۲۰ تا ۲۲ ولتاژ مورد نیاز جرقه در هنگام کارکرد موتور با سوخت گاز طبیعی در شرایط بار کامل، برای شمع‌های نو و کار کرده با یکدیگر مقایسه شده است. ولتاژ مورد نیاز جرقه برای تمامی شمع‌ها بعد از آزمون دوام افزایش پیدا کرده است.



شکل ۲۰ ولتاژ مورد نیاز جرقه برای شمع نو و کار کرده نوع اول در شرایط بار کامل با استفاده از سوخت گاز طبیعی (استوانه شماره ۲)



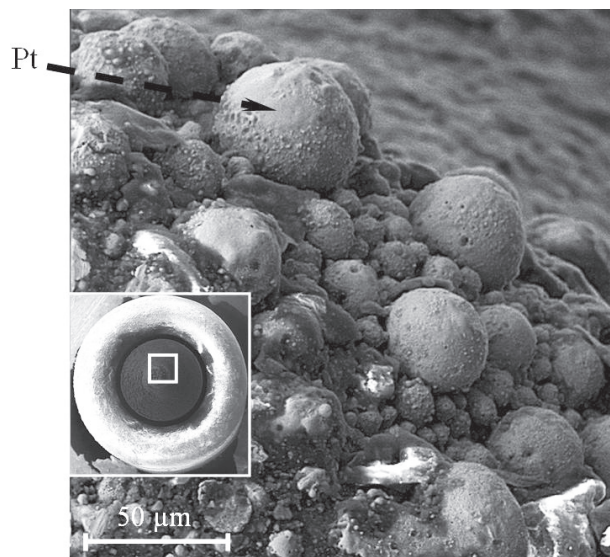
شکل ۲۱ ولتاژ مورد نیاز جرقه برای شمع نو و کار کرده نوع دوم در شرایط بار کامل با استفاده از سوخت گاز طبیعی (استوانه شماره ۲)



شکل ۲۲ ولتاژ مورد نیاز جرقه برای شمع نو و کار کرده نوع سوم در شرایط بار کامل با استفاده از سوخت گاز طبیعی (استوانه شماره ۲)

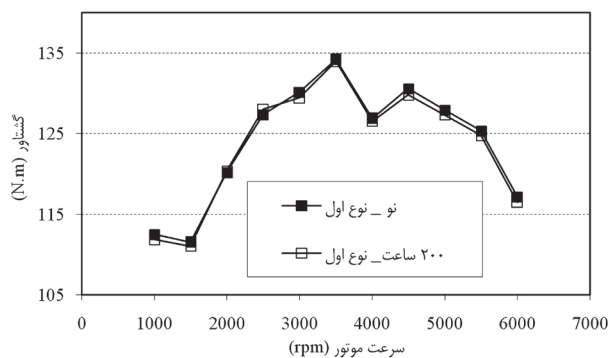
از طریق گرد و خاک موجود در هوا به محفظه احتراق راه پیدا می‌کند. کلسیم و منیزیم هر دو جزء افزودنی‌های روغن هستند که کلسیم به میزان بیشتری در سطح الکتروده رسوب کرده است.

در شمع نوع دوم که دارای الکتروده مرکزی ظریف است، سطح الکتروده در نقاط مختلف متفاوت می‌باشد. در قسمت نوک الکتروده برآمدگی‌های کروی شکل مشاهده می‌شود و همچنین قسمت‌هایی براق به نظر می‌رسند. در قسمت انتهایی الکتروده سطح الکتروده در دو بخش دارای شکلی متفاوت است. در یک سمت، سطح الکتروده متخلخل و در سمت دیگر هموارتر به نظر می‌رسد. از پلاتین در ساخت الکتروده مرکزی استفاده شده است و تخلیه الکتریکی در محیطی که دارای هوای زیاد است سبب تولید برآمدگی‌های کروی شکل در نزدیکی نوک الکتروده شده است. [۱۲] در شکل ۱۹، نوک الکتروده مرکزی و برآمدگی‌های کروی شکل نشان داده شده است.



شکل ۱۹ برآمدگی‌های کروی شکل نوک الکتروده مرکزی شمع نوع دوم، بعد از ۲۰۰ ساعت کارکرد در آزمون دوام (استوانه شماره ۲)

بررسی مواد موجود در نوک الکتروده بیانگر میزان بالای کربن است و علاوه بر کربن، کلسیم نیز در سطح الکتروده وجود دارد اما با توجه به تمایل کم فلز پلاتینیوم برای ایجاد ترکیب، کلسیم نتوانسته است سبب رفتگی قابل ملاحظه‌ای شود.



شکل ۲۳ گشتاور موتور با استفاده از شمع‌های نو و کارکرده نوع اول در هنگام کارکرد موتور با سوخت گاز طبیعی در شرایط بار کامل

بررسی داده‌های مربوط به حسگر فشار داخل استوانه نشان می‌دهد که در هنگام کارکرد موتور با سوخت گاز طبیعی، استفاده از شمع کارکرده تاثیر محسوسی بر میزان IMEP و بیشینه فشار داخل استوانه نداشته است. به طوری که برای شمع کارکرده نوع اول، بیشترین اختلاف در سرعت ۲۵۰۰ د.د. رخ می‌دهد و میزان IMEP از ۸/۳۸ بار به ۸/۲۸ بار کاهش می‌یابد. اما در هنگام کارکرد موتور با سوخت بنزین، استفاده از شمع کارکرده نوع اول سبب افت مقادیر IMEP شده است. در سرعت ۳۵۰۰ د.د.، IMEP برای شمع کارکرده، ۲/۵ درصد کاهش می‌یابد. در این نقطه بیشترین افت رخ می‌دهد و میزان IMEP از ۱۰/۷۸ به ۱۰/۵۱ بار کاهش یافته است. در شکل‌های ۲۴ و ۲۵، مقایسه گشتاور تولیدی موتور با استفاده از شمع‌های نو و کارکرده در هنگام کارکرد موتور با سوخت بنزین نشان داده شده است. استفاده از شمع کارکرده نوع اول سبب افت گشتاور شده است. در حالی که تفاوت قابل ملاحظه‌ای بین شمع نو و کارکرده نوع دوم وجود ندارد. افزایش دهانه و جرعه جانبی در شمع نوع اول سبب افت گشتاور تولیدی شده است. اما شمع نوع دوم افزایش دهانه چندان نداشته است و همچنین بررسی شمع‌ها در دستگاه آزمون، نشان داد که وضعیت جرعه‌زنی برای این شمع بعد از آزمون دوام نیز مطلوب است. وقوع جرعه جانبی در شمع‌های نوع اول و سوم می‌تواند سبب افزایش نوسانات احتراق شود. به کمک داده‌های حسگر فشار می‌توان نوسانات احتراق را محاسبه نمود. این متغیر طبق رابطه ۱، از تقسیم انحراف معیار مقادیر اندازه‌گیری شده IMEP بر میانگین مقادیر IMEP به دست می‌آید:

$$COV(IMEP) = \frac{S(IMEP)}{\overline{IMEP}} \times 100 \quad (1)$$

بیشینه ولتاژ مورد نیاز برای شمع نوع اول، ۳۲ درصد و برای شمع نوع سوم ۴۰ درصد افزایش پیدا کرده است. میزان افزایش ولتاژ برای شمع نوع دوم کمتر از سایر شمع‌ها است. به طوری که بیشینه ولتاژ مورد نیاز ۱۷ درصد افزایش داشته است. افزایش دهانه شمع‌های نوع اول و سوم سبب افزایش ولتاژ مورد نیاز شده است. یکی دیگر از عوامل موثر در کاهش ولتاژ مورد نیاز جرعه، شدت میدان الکتریکی در دهانه شمع است. با کاهش قطر الکترودها، شدت میدان الکتریکی در دهانه شمع افزایش یافته و ولتاژ مورد نیاز کاهش می‌یابد [۷]. شمع‌های نوع دوم مورد استفاده در آزمون دارای الکتروتود مرکزی ظریف هستند که سبب تقویت میدان الکتریکی در دهانه شمع شده و ولتاژ مورد نیاز را کاهش می‌دهد. الکتروتود منفی در شمع نوع سوم دارای یک شیار است که سبب کاهش ولتاژ مورد نیاز می‌شود اما در اثر کارکرد شمع، این شیار از بین رفته و سبب افزایش ولتاژ مورد نیاز شده است.

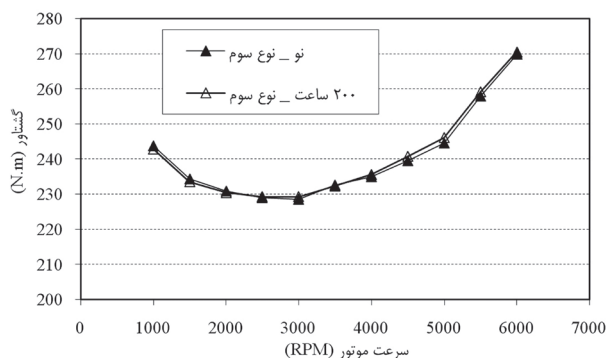
هر چند ولتاژ مورد نیاز برای تمام شمع‌ها افزایش یافته است اما این مقدار همچنان در محدوده مجاز قرار دارد زیرا ولتاژ قابل تأمین توسط سیم‌پیچ افروزش در موتور مورد آزمون، حدود ۴۴ کیلو ولت است و می‌تواند به راحتی ولتاژ مورد نیاز جرعه را تأمین کند. اما افزایش ولتاژ سبب گرم شدن سیم‌پیچ افروزش شده و می‌تواند سبب کاهش عمر مفید آن شود. از طرفی، همان‌طور که در دستگاه آزمون شمع مشاهده شد، در شمع‌های نوع اول و سوم به علت افزایش دهانه و رسوب‌گیری سطح عایق، جرعه جانبی رخ می‌دهد.

۳-۸- بررسی عملکرد موتور

پس از بررسی عملکرد موتور با شمع‌های نو، آزمون احتراقی با شمع‌های کارکرده انجام شد تا تاثیر رفتگی الکترودها بر عملکرد موتور مورد بررسی قرار گیرد. مقایسه شمع‌های نو با شمع‌های کارکرده نشان می‌دهد که در هنگام استفاده از سوخت گاز طبیعی عملکرد موتور افت محسوسی نداشته است. در شکل ۲۳ گشتاور تولیدی موتور با استفاده از شمع‌های کارکرده نوع اول با گشتاور موتور در هنگام استفاده از شمع‌های نو در هنگام کارکرد موتور با سوخت گاز طبیعی در شرایط بار کامل مقایسه شده است.

۳-۹- مصرف سوخت ویژه

همان‌طور که در شکل ۲۷، مشاهده می‌شود، استفاده از شمع‌های کارکرده، تأثیر قابل ملاحظه‌ای در مصرف سوخت ویژه نداشته است. در بیشتر نقاط آزمون بار کامل، مصرف سوخت ویژه با استفاده از شمع نو و کارکرده تغییری نکرده است. بیشترین اختلاف در سرعت ۵۰۰۰ د.د. رخ می‌دهد که میزان آن تنها ۰/۶ درصد است.



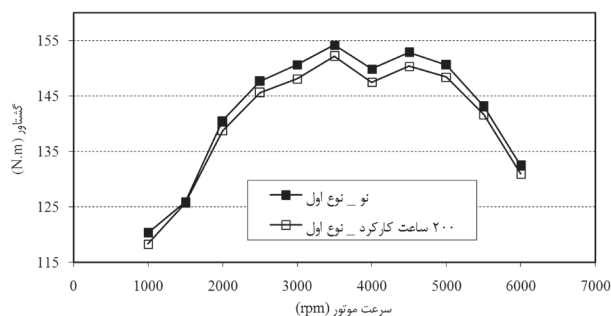
شکل ۲۷ مقایسه مصرف سوخت ویژه با استفاده از شمع‌های نو و کارکرده نوع سوم در هنگام کارکرد موتور با سوخت گاز طبیعی در شرایط بار کامل

۴- نتیجه‌گیری

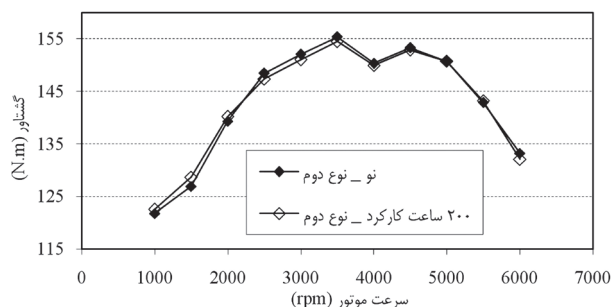
در آزمون موتوری با شمع‌های نو، ولتاژ مورد نیاز برای شمع نوع سوم که دارای الکتروده منفی شیاردار است، کمتر از سایر شمع‌ها است. به‌طوری که در سرعت ۱۰۰۰ د.د.، ۲۱ درصد ولتاژ کمتری نیاز دارد. بررسی عملکرد موتور نشان می‌دهد که گشتاور موتور با استفاده از شمع نوع سوم بیش از سایر شمع‌ها است و گشتاور موتور با استفاده از شمع نوع دوم کمترین مقادیر را دارد. لذا استفاده از الکترودهای ظریف سبب بهبود عملکرد موتور گاز سوز نشده است. مقایسه مصرف سوخت ویژه نشان می‌دهد که هندسه الکترودها تأثیر قابل ملاحظه‌ای در مصرف سوخت ویژه نداشته است. در یک موتور پایه گازسوز، رفتگی شمع‌هایی که الکترودهایی با پایه نیکل دارند نسبت به شمع‌هایی که از الکترودهای پلاتینی استفاده می‌کنند بیشتر است. میانگین نرخ افزایش دهانه برای الکترودهای پلاتینی (شمع نوع دوم) ۰/۱۸ میکرومتر به ازای هر یک ساعت کارکرد در آزمون دوام است اما برای الکترودهای پایه نیکل این مقدار در ۵۰ ساعت ۰/۵۱ میکرومتر بوده و با افزایش ساعت کارکرد به ۲۰۶ ساعت به ۱/۳۱ میکرومتر رسید.

بررسی سطح الکترودها به کمک SEM نشان می‌دهد که ترک‌ها و حفره‌های فراوانی در سطح الکترودهای پایه نیکل وجود دارد که

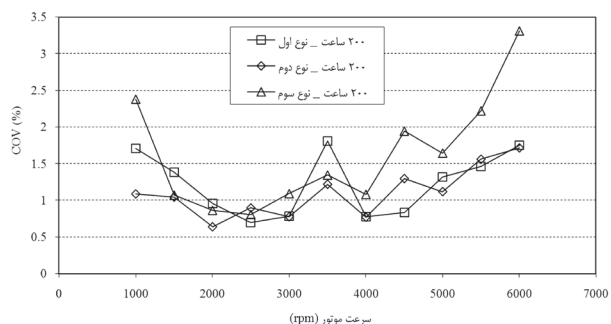
اگر مقدار به دست آمده از ۱۰ درصد تجاوز کند، سبب بروز مشکل خواهد شد [۱۷]. در شکل ۲۶، نوسانات احتراق در هنگام کارکرد موتور با بنزین، برای هر سه نوع شمع نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود که نوسانات احتراق برای تمامی شمع‌ها در محدوده مجاز قرار دارد. با این وجود، نوسانات احتراق با استفاده از شمع‌های نوع اول و سوم بیش از شمع نوع دوم است.



شکل ۲۴ گشتاور موتور با استفاده از شمع‌های نو و کارکرده نوع اول در هنگام کارکرد موتور با سوخت بنزین در شرایط بار کامل



شکل ۲۵ گشتاور موتور با استفاده از شمع‌های نو و کارکرده نوع دوم در هنگام کارکرد موتور با سوخت بنزین در شرایط بار کامل



شکل ۲۶ مقایسه نوسانات احتراق برای شمع‌های کارکرده در هنگام کارکرد موتور با سوخت بنزین

مقایسه گشتاور تولیدی برای شمع‌های نو و کارکرده نشان می‌دهد که در اثر استفاده از شمع‌های کارکرده، گشتاور افت پیدا نکرده است و همچنین استفاده از شمع‌های کارکرده سبب افزایش مصرف سوخت ویژه موتور گاز سوز نشده است.

جمع‌بندی نتایج آزمون نشان می‌دهد که در هنگام کارکرد موتور با سوخت گاز طبیعی، ولتاژ مورد نیاز جرّقه اهمیت بیشتری دارد و استفاده از شمع‌های کارکرده سبب افزایش ولتاژ مورد نیاز می‌شود که این افزایش ولتاژ ممکن است سبب صدمه به سامانه جرّقه شود. همچنین افزایش نوسانات احتراق نیز باید مورد توجه قرار گیرد.

تشکر و قدردانی

تمام مراحل این تحقیق در شرکت تحقیق، طراحی و تولید موتور ایران خودرو (ایپکو) انجام شده است. لذا مراتب تشکر و قدردانی از مساعدت‌های مدیریت و پرسنل واحد آزمایشگاه اعلام می‌گردد.

این ترک‌ها سبب افزایش نرخ رفتگی شده است. از طرفی بررسی مواد موجود در سطح، نشان دهنده وجود میزان زیادی از کلسیم و اکسیژن در سطح الکترودهای پایه نیکل است، اکسید کلسیم سبب کاهش مقاومت الکترودها شده و منجر به افزایش رفتگی می‌شود.

بعد از طی کردن ۲۰۰ ساعت آزمون دوام، ولتاژ مورد نیاز جرّقه برای تمامی شمع‌ها افزایش یافته است. میزان افزایش ولتاژ برای شمع با الکترودهای ظریف کمتر از سایر شمع‌ها است. بیشینه ولتاژ مورد نیاز برای این شمع ۱۷ درصد افزایش پیدا کرده است در حالی که برای شمع‌های نوع اول و سوم، بیشینه ولتاژ مورد نیاز، به ترتیب ۴۷ و ۶۷ درصد افزایش پیدا کرده است. استفاده از پلاتین سبب محدود شدن رفتگی الکترودها و جلوگیری از افزایش دهانه در شمع با الکترودهای ظریف شده است. افزایش محدود دهانه در کنار تقویت شدت میدان الکتریکی در نوک الکترودهای ظریف سبب شده است تا میزان افزایش ولتاژ شمع نوع دوم کمتر از سایر شمع‌ها باشد. بررسی وضعیت جرّقه‌زنی شمع‌ها در فشار ۸ بار نشان می‌دهد که بعد از آزمون دوام، کیفیت جرّقه برای شمع‌های با الکترودهای پایه نیکل، افت کرده و جرّقه جانبی رخ می‌دهد. در نتیجه استفاده از شمع‌های کارکرده علاوه بر افزایش ولتاژ مورد نیاز، سبب افزایش نوسانات احتراق نیز شده است. نوسانات احتراق با استفاده از شمع‌های کارکرده نوع اول و سوم که دارای جرّقه جانبی هستند بسیار بیشتر از شمع نوع دوم بوده است. به طوری که در سرعت ۶۰۰۰ د.د.د، نوسانات احتراق با استفاده از شمع نوع سوم، ۴۸ درصد بیشتر از شمع نوع دوم بوده است.

References:

1. Daniels, F. and Scilzo, B. "the effects of electrode design on mixture ignitability." SAE Technical paper, NO. 960606.
2. Pischinger, S. "Effects of spark plug design parameters on ignition and flame development in an SI engine", PhD Thesis, MIT University, 1989.
3. Lee, M.J., Hall, M., Ezekoye, O. and Matthews R. "Voltage and energy deposition characteristics of spark ignition systems." SAE Technical paper, NO. 2005-01-0231.
4. Osamura, H. and Abe, N. "Development of new iridium alloy for spark plug electrodes." SAE Technical paper, NO. 1999-01-0796.
5. Hori, T., Shibata, M., Okabe, S. and Hashizume, K. "Super Ignition Spark Plug with Fine Center & Ground Electrodes." SAE Technical paper, NO. 2003-01-0404.
6. Lee, Y. G. and Boehler, J. T. "Flame kernel development and its effects on engine performance with various spark plug electrode configurations." SAE Technical paper, NO. 2005-01-1133.
7. Nishioka, S., Hanashi, K. and Okabe, S. "Super Ignition Spark Plug with Wear Resistive Electrode." SAE Technical Paper, No. 2008-01-0092.
8. Tanuma, T., Sasaki, K., Kaneko, T. and Kawasaki, H. "Ignition, combustion, exhaust emissions of lean mixtures in automotive spark ignition engines." SAE Technical paper NO. 7101159.
9. Beru technical group, "technical information: all about spark plugs." 2010.
10. Shimanokami, Y., Matsubura, Y., Suzuki, T. and Matsutani, W. "Development of high ignitability with small size spark plug." SAE Technical paper, NO. 2004-01-0987.
11. Ishiguro, H., Okabe, S. and Hashizume, K. "Super Carbon Fouling Resistive Small Size Spark Plug." SAE Technical paper, NO. 2005-01-1158.
12. Rager, J., Flaig, A., Schneider, G., Kaiser, T., Soldera, F. and Mucklich, F. "Oxidation Damage of Spark Plug Electrodes." *Advanced Engineering Materials*, 17 (2005) 633–640.
13. Van Basshuysen, R. and Schafer, F. *Modern engine technology from A to Z*. SAE international, 2006.
14. Ommi, F., Javan, S., Hosseini, V. and Alaviyoun, Sh. "Experimental investigation of temperature of spark plug in bi-fuel engines." 19th annual conference of mechanical engineering (ISME), Birjand University, Iran, 2011.
15. Nakano, D., Suzuki, T. and Matsui M. "Gas Engine Ignition System for Long-Life Spark Plugs." SAE Technical paper NO. 2004-32-0086.
16. Lin, T., Brady, P., Richards, K. and Layton M. "Characterization of erosion and failure processes of spark plugs after field service in natural gas engine." *International journal of wear*, 295 (2005) 1063-1067.
17. Heywood, J. B. *Internal Combustion Engine Fundamentals*. New York, McGraw Hill Inc, 1988.

Investigation of Effects of Spark Plug's Electrodes Erosion on the Required Ignition Voltage and Performance of Natural Gas Engine

S. Javan

Graduate Student
Tarbiat Modares University
S.javan@modares.ac.ir

S. V. Hosseini

PhD candidate
Irankhodro Powertrain Company (IPCO)
V_hosseini@ip-co.com

F. Ommi*

Associate professor
Tarbiat Modares University
fommi@modares.ac.ir

S. H. Alaviyoun

Engine validation expert
Irankhodro Powertrain Company (IPCO)
Sh_alaviyoun@ip-co.com

*Corresponding Authors

Received: May, 10, 2011
Accepted in Revised Form: Sep, 21, 2011

Abstract

In this research, the effect of electrode's configuration on the required voltage and performance of a natural gas fuel base engine is investigated using three types of spark plugs with the same heat range and different electrode's configuration. Then, durability of spark plugs is investigated in durability tests. Scanning electron microscope (SEM) is used to study mechanisms of electrode erosion. Also, sparking quality of spark plugs has been investigated by spark plug test rig. Finally, the effects of electrode erosion on the required voltage, performance and fuel consumption of engine will be investigated during combustion test. According to the results of new spark plugs, groove in ground electrode causes to 21% decline in required voltage. Considering results of durability tests, after 200 hours test, average of gap growth for nickel based electrodes seven times higher than platinum electrodes. SEM analysis of electrode's surface indicates many cracks and craters on the surface of nickel based electrodes. Initiation and growth of cracks and intrude of calcium oxide could lead to accelerate erosion of nickel based electrodes. Results of combustion test shows that if ignition coil could supply required voltage, electrode's erosion would not considerable effect on the amount of torque and brake specific fuel consumption (BSFC) of engine in operation with CNG.

Keywords: Spark Plug, Electrode Wear, Durability Test, Required Voltage, Engine Performance.