

مطالعه تجربی تأثیر رسوب در نوک افشانه دیزل بر رفتار فواره سوخت

میثم شیخ وظایفی^{۱*}، مفید گرجی بندپی^۲، علیرضا حاجی علی محمدی^۳، سید مصطفی آقا میرسلیم^۴

^۱ دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی بابل، بابل، ایران، meysam.vazayefi@stu.nit.ac.ir

^۲ دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی بابل، بابل، ایران، gorji@nit.ac.ir

^۳ دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران، ahajiali@semnan.ac.ir

^۴ دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران، mirsalim@csr.ir

* نویسنده مسئول

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

دریافت: ۱ مهر ۱۳۹۸

پذیرش: ۱۷ آذر ۱۳۹۸

کلیدواژه‌ها:

افشانه رسوب دار

مجرای نوک افشانه

فواره سوخت

چکیده

فشار قوی سوخت در افشانه‌های موتورهای دیزلی نسل جدید با چندین سوراخ ریز در نوک افشانه، بهبودهای قابل توجهی در رفتار فواره خروجی سوخت و عملکرد موتور ایجاد کرده است. از طرف دیگر کیفیت نامناسب سوخت و قرار گرفتن نوک افشانه در محفظه احتراق داغ، باعث تشکیل رسوبات اساسی در نوک افشانه و رفتار نامناسب فواره سوخت می‌شود. با توجه به و نزدیک ویژگی‌های عملکردی موتور با رفتار فواره خروجی سوخت، در این مطالعه به تحلیل اثرات مخرب برهمکنش جریان سوخت با رسوبات نوک افشانه‌ها با کارکردهای مختلف پرداخته شده است. رسوب‌گذاری افشانه‌ها با سوخت استاندارد و تحت شرایط آزمایشگاهی مشخص انجام می‌شود. به منظور تحلیل مشخصات رسوبات تشکیل شده در نوک افشانه‌ها از روش‌های غیرمخرب میکروسکوپی الکترونی استفاده شده است. به منظور تحلیل مشخصات فواره سوخت خروجی، عکس‌های گرفته شده از پیشروی فواره خروجی از افشانه‌ها با کارکردهای مختلف در فشارهای مختلف پاشش سوخت و محفظه حجم ثابت، توسط برنامه نوشته شده در نرم افزار متلب پردازش می‌شوند. عکس برداری در یک محفظه حجم ثابت با دوربین تندنگار انجام شده است. افزایش مقدار رسوبات افشانه، باعث افزایش تأخیر در زمان پاشش سوخت و رفتار نامناسب فواره خروجی از افشانه می‌شود. با افزایش فشار پاشش سوخت از اثرات مخرب رسوبات افشانه کاسته می‌شود.

تمامی حقوق برای انجمن علمی موتور ایران محفوظ است.



۱- مقدمه

در سال‌های اخیر موتورهای دیزل نسل جدید به دلیل بازدهی سوخت بیشتر و گشتاور قویتر در مقایسه با موتورهای بنزینی مورد توجه قرار گرفته است. افزایش نسبت توان به وزن موتور، کاهش مقدار مصرف سوخت و رعایت استانداردهای سخت‌گیرانه زیست محیطی از ویژگی‌های موتورهای دیزل نسل جدید نسبت به نسل قبلی خود است. افشانه‌های سیم‌پیچی^۱ پیشرفته در موتورهای دیزلی نسل جدید با مجراهای نوک افشانه چندگانه و کوچکتر به همراه فشار پاشش سوخت قویتر باعث اتمیزاسیون بهتر سوخت می‌شوند که نتیجه آن تندتر شدن ترکیب هوای احتراق با قطرات اتمیزه شده و بهبود قابل توجه فرآیند احتراق و عملکرد موتور است [۱-۲].

کاهش قطر مجرای نوک افشانه، کیفیت نامطلوب سوخت و قرار گرفتن نوک افشانه در داخل محفظه احتراق داغ امکان تشکیل رسوب را در نوک افشانه افزایش می‌دهد [۳]. رسوبات تشکیل شده باعث انسداد جزئی یا کامل مجراهای نوک افشانه، هدر رفت سوخت پاشیده، کاهش اتمیزه کردن سوخت و احتراق ناقص خواهند شد [۴].

با توجه به اهمیت پدیده رسوب نشینی نوک افشانه و اثرات مخرب آن بر عملکرد موتورهای احتراق داخلی، مطالعات متعددی در این زمینه انجام شده است. سانگ [۵] و وانگ [۶] با ریزبین الکترونی^۲ ساختار رسوبات تشکیل شده در افشانه بنزینی را بررسی کردند. استفاده از روش مخرب برش سیمی^۳ جهت برش مقطعی افشانه و کنده شدن ناخواسته رسوبات در طول فرآیند برش باعث شد که پژوهش آنها از دقت بالایی برخوردار نباشد.

ژو [۷] و همکاران محبوس شدن سوخت در بین لایه‌های رسوبات تشکیل شده، تشکیل بندریزه‌ها^۴ و قطرات بزرگ در فواره خروجی و تجمع سوخت در نوک افشانه رسوب‌دار بنزینی را گزارش کردند. با توجه به ماهیت سوخت دیزل، مجراهای متعدد و کوچک افشانه‌های دیزل نسل جدید و دمای داغ نوک افشانه، مقدار رسوبات تشکیل شده در این افشانه‌ها نسبت به افشانه‌های بنزینی به مراتب بیشتر است. لذا با توجه به اهمیت رسوب‌نشینی در نوک افشانه دیزل پژوهشات متعددی در این زمینه انجام شده است.

ناپولیتانو و همکاران [۸] از سه افشانه با مقدار جریان‌ات خروجی مختلف برای بررسی اثرات رسوبات نوک افشانه بر آلاینده‌گی و عملکرد موتور استفاده کردند. بعد از یک فرآیند رسوب‌گذاری شتاب‌دار افت توان موتور، داغ شدن گازهای خروجی از موتور و افزایش مقدار دوده‌ها به خصوص در افشانه با مقدار جریان ضعیف‌تر گزارش شد. مونتارانو و همکاران [۹] نیز تاثیر رسوبات تشکیل شده بر روی نوک افشانه دیزل (به روش شتاب دهنده) را بر رفتار فواره خروجی از سه

افشانه با مقدار جریان‌های خروجی مختلف بررسی کردند. بر اساس یافته‌های آنها رسوبات نوک افشانه در تمامی حالات آزمایش باعث کاهش مقدار جریان خروجی و طول نفوذ فواره گردید. بیشترین تاثیر گذاری رسوبات در افشانه با مقدار جریان خروجی کم‌تر و فشار پاشش سوخت ضعیف‌تر گزارش گردید.

رایزبرگ و همکاران [۱۰] افزایش مقدار رسوبات افشانه و کاهش تدریجی توان موتور را در روند رسوب‌گذاری شتاب‌دار گزارش نمودند. همچنین بعد از اتمام فرآیند رسوب‌گذاری و باز شدن افشانه از روی موتور دیزل آزمایشگاهی تک استوانه، کاهش قابل توجه جریان سوخت خروجی از افشانه (نسبت به قبل از آزمایش) مشاهده گردید. استنلی و همکاران [۴] از افشانه‌هایی که با کارکرد بر روی وسایل نقلیه عمومی به مرور دچار رسوبات قابل توجهی شده بودند، استفاده کردند. بعد از رسوب زدایی افشانه‌ها با محلول پاک کننده، اتمیزاسیون بهتر فواره سوخت، مصرف سوخت ویژه کمتر و افزایش توان موتور گزارش شد.

در بیشتر مطالعات انجام شده، محققان با اضافه نمودن عنصر روی و استفاده از روش‌های تسریع کننده اقدام به تشکیل رسوب در نوک افشانه دیزل نمودند [۸-۱۰]. استفاده از این روش از طرفی زمان و هزینه‌های رسوب‌گذاری افشانه را تا مقدار قابل توجهی کاهش می‌داد ولی از طرف دیگر با توجه به حساسیت شدید فرآیند رسوب‌گذاری به شرایط عملکردی افشانه، ساختار رسوبات تشکیل شده در این شرایط و تاثیر آن بر مشخصات فواره خروجی نسبت به شرایط کارکرد واقعی موتور تفاوت زیادی داشت. در روش بعدی از افشانه‌های رسوب گرفته در شرایط عملکردی واقعی موتور استفاده شد [۴]. استفاده از این روش هزینه‌های رسوب‌گذاری را تا حد زیادی کاهش می‌داد ولی ثبت دقیق شرایط کاری افشانه در این روش مشکل و تقریباً غیر ممکن بود و نتایج بدست آمده نیز از دقت و اطمینان کمتری برخوردار بودند. در این پژوهش به منظور بررسی دقیق‌تر اثرات پدیده رسوب‌نشینی، فرآیند رسوب‌گذاری افشانه‌ها با سوخت دیزل استاندارد و در چرخه دوام دیزل تا رسیدن به کارکردهای ۳۰۰ و ۷۰۰ ساعت (از زمان شروع فرآیند رسوب‌گذاری) بر روی موتور دیزل ملی انجام می‌شود. افشانه‌ها بعد از سپری نمودن ساعت‌های کارکرد مورد نظر به منظور بررسی ساختار و جنس رسوبات تشکیل شده و تحلیل مشخصه‌های فواره سوخت از روی موتور باز می‌شوند. بررسی مشخصه‌های فواره سوخت خروجی از افشانه‌ها با کارکردهای مختلف شامل طول نفوذ، سرعت، زاویه مخروط و سطح مقطع تصویر شده در فشارهای مختلف پاشش سوخت و محفظه نوآوری بعدی این پژوهش می‌باشد.

³ Wire cut

⁴ Ligaments

¹ Solenoid

² Scanning Electron Microscopy (SEM)

۲- آزمون‌های تجربی

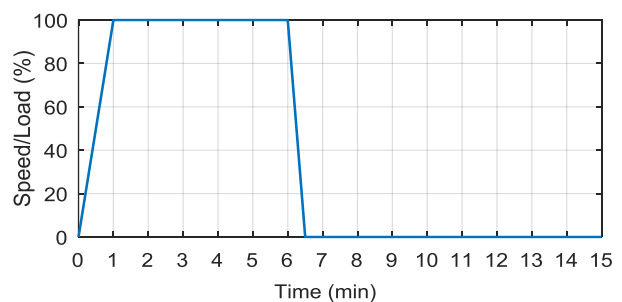
۲-۱- رسوب‌گذاری نوک افشانه

در این پژوهش به منظور بررسی دقیق‌تر اثرات مقدار رسوبات نوک افشانه بر مشخصات فواره سوخت و عملکرد افشانه، از رسوب‌گذاری افشانه به شیوه آزمایشگاهی استفاده شده است. در طول فرآیند رسوب‌گذاری، از سوخت دیزل استاندارد با مشخصات بیان شده در جدول ۱ استفاده شده است. فرآیند رسوب‌گذاری در اتاق آزمون موتور شرکت ایپکو بر روی افشانه‌های مدل CP4.1 ساخت شرکت بوش^۱ آلمان و نصب شده بر موتور دیزل EFD انجام شده است. به منظور کنترل سرعت و گشتاور موتور از یک توان‌آزمای^۲ جریان غیر مستقیم استفاده شده است.

جدول ۱: مشخصات سوخت دیزل استاندارد

مقدار مشخصه	روش آزمایش	نام مشخصه
۲,۹۹	ASTM D445	گرانروی (میلیمتر مربع بر ثانیه در ۴۰ درجه سانتیگراد)
۸۲۸	ASTM D4052	چگالی (کیلوگرم بر متر مکعب در ۱۵ درجه سانتیگراد)
۶۲	ASTM D93	نقطه اشتعال (درجه سانتیگراد)
۵۴	ASTM D976	عدد ستان

فرآیند رسوب‌گذاری مطابق چرخه دوام دیزل شکل ۱ انجام شده است. مدت زمان چرخه ۱۵ دقیقه است که نحوه کارکرد موتور در طول این چرخه نشان داده شده است. این چرخه تا رسیدن به کارکرد ۳۰۰ ساعته موتور (معادل ۱۲۰۰ سیکل) تکرار می‌شود. در این مرحله افشانه با کارکرد ۳۰۰ ساعت از روی موتور باز می‌شود.



شکل ۱: چرخه دوام دیزل [۱۱]

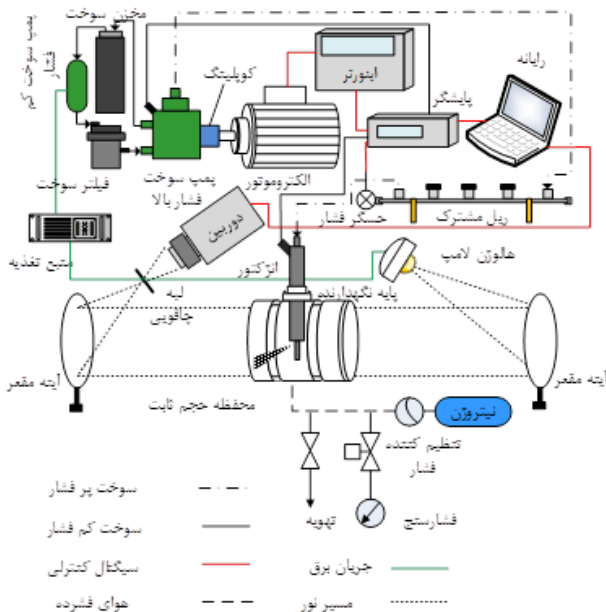
همین روند برای افشانه بعدی در زمان ۷۰۰ ساعت از زمان شروع آزمایش انجام می‌شود. با توجه به حساسیت رسوبات تشکیل شده در

نوک افشانه و امکان کنده شدن اتفاقی رسوبات در باز و بست‌های مکرر افشانه، روش مذکور جهت انجام فرآیند رسوب‌گذاری انتخاب گردید.

۲-۲- عکس‌برداری از فواره سوخت

در این پژوهش از روش عکس‌برداری شیلرین با چیدمان z شکل به منظور ثبت تصاویر پیشروی فواره سوخت در آزمایشگاه اپتیک شرکت ایپکو استفاده شده است (شکل ۲).

عملکرد روش شیلرین بر مبنای تغییر ضریب شکست پرتوهای موازی نور عبوری از منطقه آزمون بر اثر تغییر چگالی سیال نسبت به حالت پایدار در آن منطقه است.



شکل ۲: طرحواره‌ای از چیدمان تجهیزات آزمایشگاهی شیلرین

در این روش ابتدا پرتوهای واگرای خروجی از لامپ هالوژن به آینه اول با فاصله کانونی ۲۶۱۰ میلی‌متر برخورد می‌کنند. سپس دسته نور خروجی از آینه اول پس عبور از شیشه‌های شفاف محفظه حجم ثابت به صورت دسته نور موازی وارد آینه دوم با فاصله کانونی ۲۵۷۰ میلی‌متر می‌شود. در انتها دسته نور نقطه‌ای خروجی از آینه دوم وارد دوربین تندنگار کووب^۳ ساخت شرکت موشن بلیتز^۴ آلمان شده و عکس سایه فواره با سرعت ۱۷۳۱۶ عکس بر ثانیه^۵ و قدرت تفکیک^۶ تصویر ۱۶۰×۷۴ نقطه بر روی دوربین نقش می‌بندد.

به منظور افزایش فشار داخل محفظه تا ۱۰ بار از سامانه تأمین فشار هوای داخل محفظه استفاده می‌شود. این سامانه شامل مخزن گاز نیتروژن با فشار ۲۰ مگاپاسگال، لوله‌های انتقال گاز به داخل مخزن،

⁴ Motion Blitz

⁵ Frame per second

⁶ Resolution

¹ Bosch

² Dynamometers

³ Cube3

همچنین به علت تشکیل رسوب بر روی نوک افشانه در کارکردهای طولانی و قابل تشخیص نبودن روزنه هدف نوک افشانه، مطابق شکل ۳ قطعه ای فلزی به عنوان شاخص با توجه به ساختار بدنه افشانه طراحی و ساخته شده است. این شاخص فلزی به قرار گرفتن روزنه هدف رسوب دار در مقابل مجرای لوله فلزی و کاهش خطای آزمایشگاهی کمک قابل توجهی خواهد کرد.

در فرآیند عکس برداری شیلرین با توجه به اینکه عکس برداری از فواره سوخت در لحظه خروج از مجرای لوله فلزی امکان پذیر است، از این رو فاصله بین روزنه هدف نوک افشانه تا مجرای لوله فلزی به نتایج طول نفوذ افزوده می شود. در این مرحله نیز از سوخت دیزل با مشخصات ارائه شده در جدول ۱ استفاده شده است.

۲-۳- پردازش تصویر

لزوم بررسی مشخصه های متعدد فواره در طول آزمون، ۱۰ بار تکرار برای هر آزمون و تعداد زیاد تصاویر ذخیره شده در حالت های مختلف آزمون، نیازمند روشی است که بتواند این تعداد عکس را با سرعت و دقت بالا تحلیل کند. از این رو برنامه ای در نرم افزار متلب^۲ آماده شد که نسخه تغییر داده شده از برنامه ارائه شده در [۱۲] است.

در این برنامه از روش پردازش تصویر تفریقی^۸ برای بدست آوردن مشخصات فواره استفاده شده است. در شروع تحلیل، تصویر پس زمینه از تصویر هر لحظه فواره کاسته خواهد شد. این کار سبب می شود که ذرات گرد و غبار روی آینه ها، عدسی یا لنز دوربین و سایر اغتشاشات موجود در عکس ها حذف شوند و عکس باقیمانده تنها شامل فواره سوخت باشد.

برای پیدا کردن لبه های فواره از الگوی استاندارد لبه یابی کنی^۹ استفاده شده است [۱۳]. در این روش لبه های مرزی فواره با تعیین بیشینه مقدار گرادیان محلی عکس، جستجو می شود. گرادیان عکس، با مشتق تابع گوسی محاسبه می گردد. روش کار به این صورت است که مشتق تابع گوسی به تصویر اعمال شده و حاصل آن با توجه به یک حد آستانه به یک تصویر دودویی^{۱۰} تبدیل می شود. نقاطی^{۱۱} که مقدار مشتق تابع گوسی از حد آستانه تعیین شده بیشتر باشد، برابر با یک (نقاط سفید) و سایر نقاط برابر صفر (نقاط سیاه) در نظر گرفته می شود.

این روش بازدهی قوی دارد و حتی لبه های ضعیف صحیح^{۱۲} در عکس هایی با مقدار اغتشاش^{۱۳} زیاد را نیز با احتمال خوبی شناسایی می کند. لبه یابی حساس به انتخاب مقداری مناسب برای حد آستانه است. به طوری که اگر مقدار کمی برای حد آستانه تعیین شود، لبه هایی

شیرهای کنترل فشار و نشانگرهای دیجیتالی فشار محفظه است که با استفاده از آن می توان فشار هوای داخل محفظه را به مقدار دلخواه تنظیم نمود.

سامانه سوخت رسانی مورد استفاده در این پژوهش از نوع لوله مشترک^۱ است. به منظور تحلیل عملکرد واقعی موتور دیزل EFD، تلمبه^۲ فشار قوی و افشانه از این موتور انتخاب شده است. تلمبه^۲ فشار قوی CP4.1 ساخت شرکت بوش و از نوع استوانه-سمبه ای است که می تواند فشار سوخت داخل ریل مشترک را به ۲۰۰۰ بار برساند. این تلمبه نیروی محرکه خود را از موتور برقی دور ثابت ۷٫۵ کیلوواتی ساخت شرکت آ.ب.ب^۳ آلمان تأمین می کند که به منظور تنظیم دور موتور برقی و فشار تلمبه پرفشار از واروگر^۴ سه فاز آی جی ۵ آ^۵ ساخت شرکت ال جی استفاده می شود. واروگر با تغییر هم زمان ولتاژ و بسامد باعث کمترین مقدار افت توان موتور از حالت نامی می شود.

کنترل فشار، مدت زمان پاشش سوخت، دور موتور برقی و همچنین تعیین زمان شروع عکس برداری توسط واحد هدایت رایانه ای^۶ انجام می شود. این واحد نوسانات فشار سوخت را در ریل مشترک سوخت کنترل می کند تا نتایج آزمایش از دقت بالایی برخوردار باشند. شرایط انجام آزمون شیلرین به صورت کامل در جدول ۲ ارائه شده است. با توجه به امکان عکس برداری از پیشروی یک فواره سوخت در تجهیزات آزمایشگاهی شیلرین استفاده شده، یک لوله فلزی مطابق شکل ۳ بر روی افشانه بسته می شود تا فقط اجازه خروج فواره مورد نظر را از مجرای لوله فلزی بدهد. فواره های خارج شده از ۷ روزنه دیگر نوک افشانه پس از برخورد با دیواره داخلی لوله فلزی از انتهای آن به پایین محفظه فلزی هدایت می شوند.

جدول ۲: شرایط آزمون شیلرین

فشار نسبی پاشش (بار)	۱۵۰۰، ۱۰۰۰، ۵۰۰
فشار مطلق محفظه (بار)	۱۰،۸۷، ۵،۸۷، ۰،۸۷
دمای محفظه (کلوین)	۲۹۳
مدت زمان پاشش (میلی ثانیه)	۳-۲
قطر مجرای نوک افشانه (میکرومتر)	۱۲۰



شکل ۳: افشانه دیزل

⁸ Subtraction

⁹ Canny edge detection

¹⁰ Binary image

¹¹ Pixels

¹² True weak edges

¹³ Noise

¹ Common Rail

² Pump

³ ABB

⁴ Inverter

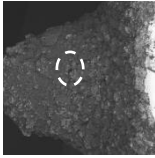
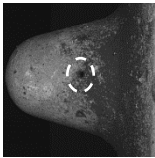
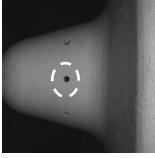
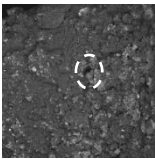
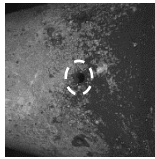
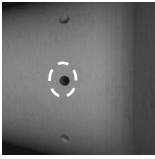
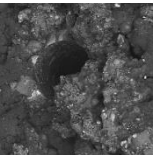
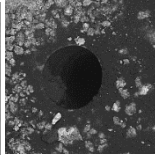
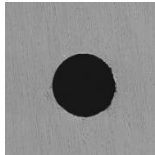
⁵ iG5A

⁶ Electronic Control Unit (ECU)

⁷ MATLAB Software

با رسیدن کارکرد افشانه به ۳۰۰ ساعت، به تدریج رسوبات بر روی سطح نوک افشانه به صورت پراکنده و با ضخامت ناچیز و قسمتی از دهانه روزنه نوک افشانه تا ارتفاع ۴۰ میکرون تشکیل می‌گردند.

رسوبات تشکیل شده تا ۲۰ درصد از سطح دهانه روزنه را در بر گرفته اند. با افزایش کارکرد افشانه تا ۷۰۰ ساعت به تدریج بر مقدار رسوبات سطح نوک افشانه و روزنه آن افزوده شده و رسوبات در قسمتی از دهانه روزنه تا ارتفاع ۶۲ میکرون و نواحی نزدیک به آن با ضخامت قابل توجه تشکیل می‌شوند و دست کم ۴۰ درصد از دهانه روزنه را در بر می‌گیرند.

بزرگنمایی	۷۰۰ ساعت کارکرد	۳۰۰ ساعت کارکرد	بدون کارکرد
۵۰ برابر			
۸۰ برابر			
۵۰۰ برابر			

شکل ۴: تصاویر SEM نوک افشانه با کارکردهای مختلف

به منظور تحلیل جنس رسوبات تشکیل شده در نوک افشانه با کارکردهای مختلف از طیف سنجی پراش انرژی پرتو ایکس^۳ استفاده شده است. در این روش با پرتاب فوتون‌ها با طول موج معین و دریافت و تحلیل طول موج‌های ساطع شده (هر طول موجی نشانگر عنصر مشخصی برای دستگاه است) اقدام به تشخیص عناصر تشکیل دهنده رسوب می‌شود.

مطابق جدول ۳، عناصر بدست آمده از عکس برداری EDX برای افشانه بدون کارکرد اکسیژن، کروم، آهن و نیکل است. با توجه به نبود رسوب در این حالت می‌توان نتیجه گرفت که کروم، آهن و نیکل با درصدهای وزنی ۱،۶، ۹۱،۸۴ و ۱،۳۲ عناصر تشکیل دهنده در ساخت نوک افشانه اند.

با افزایش کارکرد افشانه از ۳۰۰ به ۷۰۰ ساعت، درصد وزنی کربن موجود در رسوبات نوک افشانه از ۵۹،۳۳ به ۴۵،۲۵ کاهش می‌یابد. در کارکرد ۳۰۰ ساعته افشانه به علت سوختن گازوئیل و احتراق در داخل موتور، مقدار زیادی از رسوبات را عنصر کربن تشکیل می‌دهد.

بیرون از ناحیه فواره ظاهر می‌شود و از طرفی اگر مقدار حد آستانه زیاد تعیین شود، کیفیت تشخیص لبه به ویژه در نواحی رقیق سوخت، کاهش می‌یابد.

در این پژوهش حد آستانه ۰،۰۶ مناسب ترین مقدار برای لبه یابی دقیق فواره بوده و در تحلیل عکس‌های فواره از این مقدار استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد که تغییر حد آستانه تا ۳ درصد در نتایج طول نفوذ فواره تأثیرگذار خواهد بود که مقدار خطای قابل قبولی در روش آزمایشگاهی است. به منظور محاسبه طول نفوذ فواره، پایش تصویر دودویی از انتهای تاریک تصویر به سمت بالای تصویر و رسیدن به اولین نقطه روشن توسط برنامه متلب ادامه می‌یابد. این نقطه به عنوان نقطه پیشتاز فواره در نظر گرفته می‌شود و فاصله این نقطه تا محل خروج فواره (در راستای محور پاشش) محاسبه شده و در ضریب مقیاس ضرب می‌شود تا عمق نفوذ فواره بدست آید.

ضریب مقیاس عکس‌ها از تقسیم اندازه قطر لوله فلزی بر تعداد پیکسل‌های قطر لوله در عکس دودویی تصویر پس زمینه بدست می‌آید.

سرعت لبه پیشتاز فواره از تقسیم مسافت پیموده شده توسط لبه فواره بر مدت زمان لازم برای پیمودن آن مسافت بدست می‌آید. با توجه به سرعت عکس‌برداری، فاصله زمانی بین دو عکس متوالی فواره ۰/۰۵۷۷۵ میلی‌ثانیه است. به عبارت دیگر سرعت فواره محاسبه شده توسط برنامه متلب سرعت میانگین لبه فواره بین دو عکس متوالی است. برای محاسبه سطح فواره، ابتدا تصویر خاکستری^۱ حاصل از تفریق تصویر پس زمینه از عکس فواره با روش اتسو^۲ [۱۴] به یک تصویر دودویی تبدیل می‌شود. در نهایت پس از ضرب تعداد نقاط سفید تصویر دودویی بدست آمده در مربع ضریب مقیاس تصاویر، مقدار سطح مقطع تصویر شده فواره بدست می‌آید.

۳- بحث بر روی نتایج

در این بخش، ابتدا ساختار و جنس رسوبات تشکیل شده در نوک افشانه‌ها با کارکردهای مختلف بررسی می‌شود. سپس به بررسی تأثیر این رسوبات بر مشخصات کلان فواره سوخت از قبیل طول نفوذ، زاویه مخروط، سرعت متوسط لبه و سطح مقطع تصویر شده در فشارهای مختلف پاشش و محفظه پرداخته خواهد شد.

۳-۱- تحلیل مشخصات رسوبات افشانه‌های کارکرده

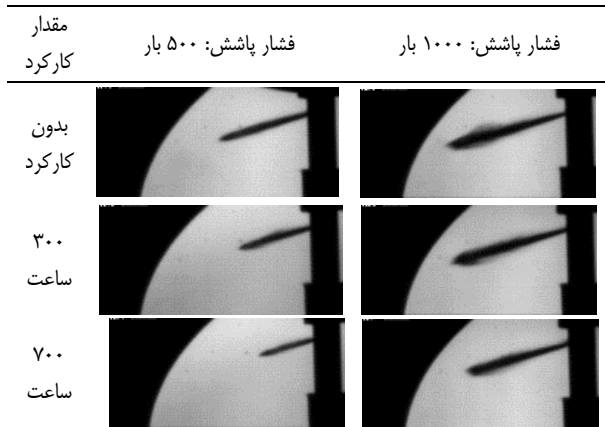
شکل ۴ عکس‌های SEM گرفته شده از نوک افشانه را در کارکردهای مختلف نشان می‌دهد. در ابتدا روزنه مورد نظر و سطح نوک افشانه عاری از هر گونه رسوب گرفتگی است.

³ Energy Dispersive X-Ray (EDX)

¹ Grayscale image

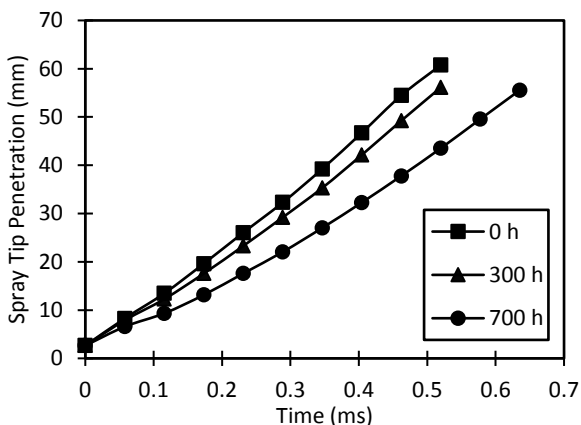
² Otsu's method

ساعت تأخیر ناچیزی داشته و تقریباً همزمان با فواره آزاد به دیواره می‌رسند.



شکل ۵: تصاویر فواره دیزل در ۰,۲۹ میلی ثانیه بعد از شروع پاشش و فشار محفظه ۰,۸۷ بار

مقایسه نمودارهای طول نفوذ فواره شکل ۶ در فشار پاشش ۵۰۰ بار نشان می‌دهد که متوسط کاهش طول نفوذ افشانه‌ها با کارکردهای ۳۰۰ و ۷۰۰ ساعت به ترتیب ۸ و ۱۴ درصد نسبت به افشانه نو است.



شکل ۶: طول نفوذ فواره خروجی از افشانه با کارکردهای مختلف بر حسب زمان در فشار پاشش ۵۰۰ بار و فشار مطلق محفظه ۰,۸۷ بار

در فشار پاشش ۱۵۰۰ بار به علت زیاد این فشار در برابر رسوبات افشانه، اختلاف ناچیزی در مقدار طول نفوذ فواره برای افشانه‌های کارکرده نسبت به افشانه نو وجود خواهد داشت به طوری که متوسط کاهش طول نفوذ افشانه‌ها با کارکردهای ۳۰۰ و ۷۰۰ ساعت به ترتیب ۳ و ۴ درصد نسبت به افشانه نو است که به وضوح در شکل ۷ مشخص است.

به تدریج با افزایش کارکرد افشانه کربن موجود در رسوبات سوخته و کاهش می‌یابد و جای خود را به عناصر سنگین فلزی از جمله آلومینیوم و روی می‌دهد که با کارکرد موتور به تدریج در نوک افشانه رسوب می‌کنند و با افزایش کارکرد افشانه بر مقدار آنها افزوده می‌شود. مقدار زیادی عنصر آلومینیوم می‌تواند حاصل سایش بین سمبه^۱ و بستار^۲ آلومینیومی و رسوب ذرات آلومینیومی حاصل از این سایش بر روی سر نوک افشانه و ناخالصی‌های موجود در سوخت دیزل باشد.

جدول ۳: نتایج عکس برداری EDX از نوک افشانه

درصد وزنی عناصر	بدون کارکرد	۳۰۰ ساعت کارکرد	۷۰۰ ساعت کارکرد
کربن	-	۵۹,۳۳	۴۵,۲۵
روی	-	۰,۲۶	۰,۵۶
اکسیژن	۵,۲۴	۲۹,۱۸	۲۴,۶۵
کروم	۱,۶	-	-
آهن	۹۱,۸۴	-	-
نیکل	۱,۳۲	-	-
آلومینیوم	-	۱۱,۲۳	۲۹,۵۴

انتقال سوخت دیزل با تجهیزات حمل و نقل و نگهداری آن در مخازن سوخت باعث ایجاد عنصر روی در ترکیب سوخت مصرفی خواهد شد. همچنین داغ بودن محفظه احتراق باعث تشکیل رسوبات روی در نوک افشانه خواهد شد که مقدار آن با استفاده طولانی از افشانه افزایش می‌یابد به طوری که در افشانه‌ها با کارکردهای ۳۰۰ و ۷۰۰ ساعت، درصد وزنی عنصر روی در ترکیب رسوبات تشکیل شده به ترتیب ۰,۲۶ و ۰,۵۶ خواهد بود.

۲-۳- تحلیل رفتار فواره خروجی از افشانه رسوب‌دار

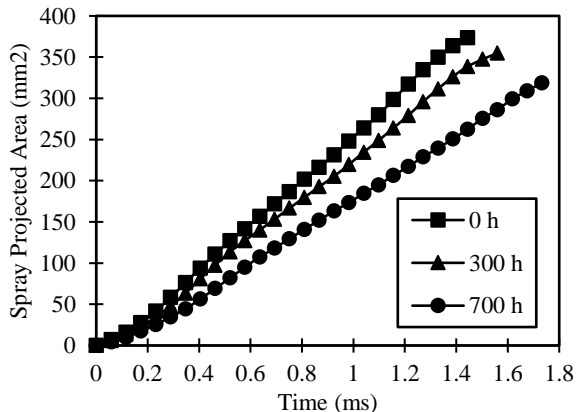
تصاویر فواره برای افشانه‌ها با کارکردهای مختلف در زمان ۰,۲۹ میلی ثانیه بعد از شروع پاشش سوخت برای فشارهای پاشش ۵۰۰ و ۱۰۰۰ بار و فشار محفظه ۰,۸۷ بار در شکل ۵ نشان داده شده است. در فشار پاشش ۵۰۰ بار به دلیل مقاومت شدید رسوبات مجرای نوک افشانه در مقابل جریان عبوری سوخت، زمان تأخیر در پاشش نیز بیشتر خواهد بود به طوری که این زمان برای افشانه‌های رسوب‌دار با کارکردهای ۳۰۰ و ۷۰۰ ساعت به ترتیب ۰,۱۱ و ۰,۱۹ میلی ثانیه نسبت به افشانه نو است.

در فشار پاشش ۱۰۰۰ بار فواره‌های خروجی از افشانه‌ها با کارکردهای ۳۰۰ و ۷۰۰ ساعت به ترتیب با تأخیرهای زمانی ۰,۰۲۸ و ۰,۰۸۶ میلی ثانیه نسبت به فواره آزاد به دیواره می‌رسند. در فشار پاشش ۱۵۰۰ بار به دلیل فشار قوی سوخت و غلبه آن بر رسوبات مجرای نوک افشانه، فواره‌های سوخت خروجی از افشانه‌های کارکرده حتی در کارکرد ۷۰۰

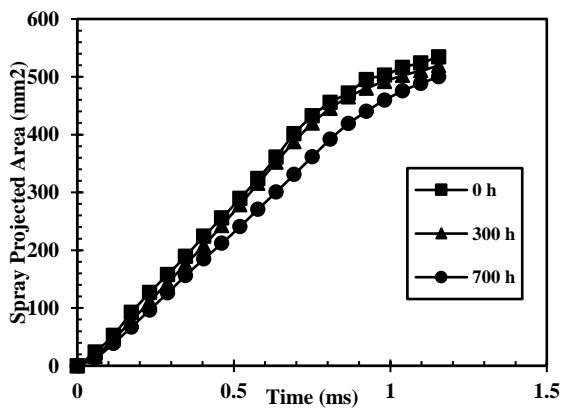
² Cylinder head

¹ Piston

افشانه، برخورد جریان سوخت پاشیده شده با رسوبات تشکیل شده افزایش یافته و منجر به اتلاف انرژی جنبشی جریان و کاهش سرعت فواره خروجی از افشانه می‌شود. همچنین منحنی‌های سرعت لبه فواره در تمامی حالات نشان داده شده دارای یک مقدار بیشینه اند. زمان رسیدن سرعت فواره به مقدار بیشینه خود با مقدار کارکرد افشانه رابطه مستقیم داشته و با افزایش مقدار کارکرد افشانه و تأخیر در زمان پاشش سوخت این زمان افزایش خواهد یافت. افت سرعت فواره بعد از مقدار ماکزیمم برای تمامی حالات نشان داده شده می‌تواند به علت پخش شعاعی فواره باشد. با افزایش فشار پاشش سوخت، جریان سوخت در انرژی جنبشی بیشتر و توان قویتری از میان رسوبات تشکیل شده در نوک افشانه عبور کرده و مقدار افت سرعت فواره خروجی از افشانه‌های کارکرده نسبت به افشانه بدون کارکرد در فشارهای قویتر کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش فشار پاشش سوخت، اختلاف سرعت بین افشانه‌ها با کارکردهای مختلف نیز کاهش می‌یابد به طوری که این اختلاف در فشار پاشش ۱۵۰۰ بار به طرز محسوسی کم شده و نمودارهای سرعت (نسبت به فشارهای پاشش ضعیف‌تر) به همدیگر نزدیک‌تر می‌شوند. شکل‌های ۱۰ و ۱۱ سطح مقطع‌های تصویر شده فواره در کارکردهای مختلف افشانه را به ترتیب در فشارهای پاشش ۵۰۰ و ۱۵۰۰ بار و فشار محفظه ۱۰٫۸۷ بار نشان می‌دهد.

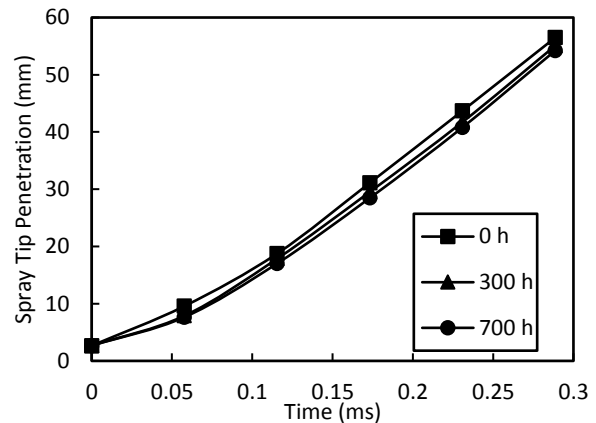


شکل ۱۰: سطح مقطع فواره خروجی افشانه با کارکردهای مختلف بر حسب زمان در فشار پاشش ۵۰۰ بار و فشار مطلق محفظه ۱۰٫۸۷ بار

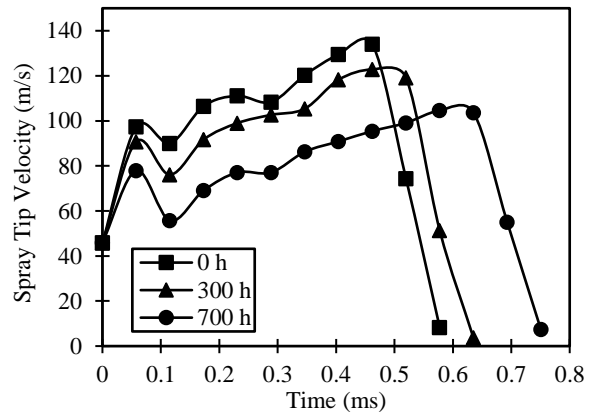


شکل ۱۱: سطح مقطع فواره خروجی افشانه با کارکردهای مختلف بر حسب زمان در فشار پاشش ۱۵۰۰ بار و فشار مطلق محفظه ۱۰٫۸۷ بار

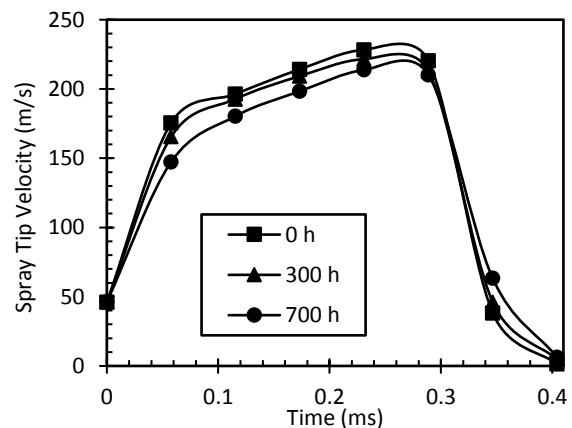
شکل‌های ۸ و ۹ سرعت‌های متوسط فواره را برای افشانه‌ها با کارکردهای مختلف در فشارهای پاشش ۵۰۰ و ۱۵۰۰ بار و فشار محفظه ۰٫۸۷ بار نشان می‌دهد.



شکل ۷: طول نفوذ فواره خروجی از افشانه با کارکردهای مختلف بر حسب زمان در فشار پاشش ۱۵۰۰ بار و فشار مطلق محفظه ۰٫۸۷ بار



شکل ۸: سرعت میانگین لبه فواره خروجی افشانه با کارکردهای مختلف در فشار پاشش ۵۰۰ بار و فشار مطلق محفظه ۰٫۸۷ بار



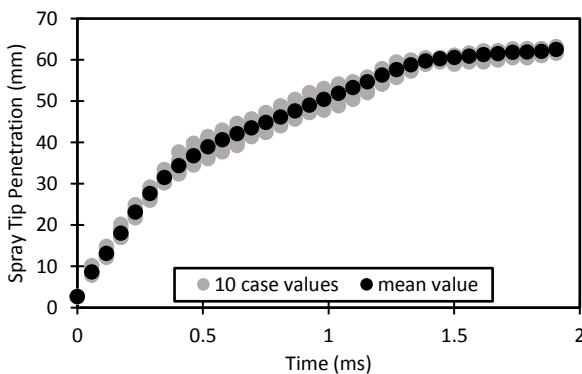
شکل ۹: سرعت میانگین لبه فواره خروجی از افشانه با کارکردهای مختلف در فشار پاشش ۱۵۰۰ بار و فشار مطلق محفظه ۰٫۸۷ بار

بر اساس منحنی‌های سرعت نشان داده شده، در تمامی فشارهای پاشش با افزایش مقدار کارکرد افشانه و بیشتر شدن مقدار رسوبات نوک

در تمامی فشارهای پاشش و محفظه، رسوبات نوک افشانه باعث کاهش مقدار جریان خروجی از افشانه و زاویه مخروطی فواره می‌شود و با افزایش کارکرد افشانه و افزایش رفتن مقدار رسوبات نوک افشانه، زاویه مخروطی فواره سوخت کاهش بیشتری را تجربه می‌کند. از سوی دیگر با افزایش فشار پاشش اثرات مخرب رسوبات بر رفتار فواره سوخت کمتر شده و از مقدار افت زاویه فواره خروجی از افشانه‌های کارکرده (نسبت به افشانه نو) کاسته می‌شود.

۳-۳- بررسی عدم اطمینان در نتایج تجربی

نتایج آزمون‌های تجربی همواره با خطای تجهیزاتی استفاده شده در آزمون‌ها و خطای انسانی همراه است. رفتار نامنظم بلندشدگی سوزن افشانه و عدم تکرارپذیری آن، توزیع تصادفی رسوبات تشکیل شده در داخل مجرای نوک افشانه و رفتار آشفته^۱ فواره خروجی از نوک افشانه، خطای انسانی در انجام آزمون‌ها و پردازش تصویر از عوامل اصلی عدم اطمینان در داده‌های تجربی اندازه‌گیری شده در این پژوهش هستند. بخش قابل توجهی از خطاهای پردازش تصویر مربوط به حساسیت روش لبه‌یابی است. تار و لکه‌دار بودن تصاویر و همچنین عدم انطباق کانونی سامانه نوری سبب افزایش عدم اطمینان در لبه‌یابی فواره می‌شود. به منظور نمایش بهتر مفهوم عدم اطمینان در نتایج تجربی، طول نفوذهای اندازه‌گیری شده برای ۱۰ بار تکرار به همراه مقدار میانگین تکرارها در فشار پاشش ۵۰۰ بار و فشار محفظه ۱۰.۸۷ بار در شکل ۱۴ نشان داده شده است.



شکل ۱۴: پراکندگی مقدار نفوذ فواره در ۱۰ بار تکرار آزمون و مقدار میانگین نفوذ فواره در فشار پاشش ۵۰۰ بار و فشار محفظه ۱۰.۸۷ بار

مقدار تغییرات داده‌های اندازه‌گیری شده نسبت به مقدار متوسط برای ۱۰ تکرار انجام شده تحت شرایط آزمایشگاهی یکسان، ۳ تا ۸ درصد برای طول نفوذ، ۵ تا ۹ درصد برای سطح مقطع تصویر شده و ۴ تا ۷ درصد برای زاویه مخروطی افشانه است که تکرارپذیر بودن نتایج را نشان می‌دهد.

بر اساس نتایج ارائه شده در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ میانگین کاهش سطح مقطع فواره خروجی از افشانه‌ها با کارکردهای ۳۰۰ و ۷۰۰ ساعت نسبت به افشانه بدون کارکرد ۸ و ۱۷ درصد برای فشار پاشش ۵۰۰ بار و ۴ و ۱۳ درصد برای فشار پاشش ۱۵۰۰ بار است.

بنابراین با افزایش فشار پاشش اختلاف سطح مقطع فواره در افشانه با کارکردهای مختلف کمتر شده و نمودارهای سطح مقطع به همدیگر نزدیک‌تر می‌شوند. میانگین کاهش سطح مقطع فواره برای تمامی حالت‌ها، از لحظه خروج فواره از افشانه تا لحظه قبل از برخورد با دیواره محفظه حجم ثابت محاسبه شده است.

شکل‌های ۱۲ و ۱۳ فواره‌های خروجی از افشانه‌ها با کارکردهای ۳۰۰ و ۷۰۰ ساعت را در فشارهای مختلف پاشش سوخت و محفظه نشان می‌دهند.

فشار پاشش	فشار محفظه: ۰.۸۷ بار	فشار محفظه: ۱۰.۸۷ بار
۵۰۰ بار		
۱۰۰۰ بار		
۱۵۰۰ بار		

شکل ۱۲: زاویه مخروطی فواره خروجی افشانه با کارکرد ۳۰۰ ساعت در آستانه برخورد با دیواره برای فشارهای مختلف پاشش و محفظه

فشار پاشش	فشار محفظه: ۰.۸۷ بار	فشار محفظه: ۱۰.۸۷ بار
۵۰۰ بار		
۱۰۰۰ بار		
۱۵۰۰ بار		

شکل ۱۳: زاویه مخروطی فواره خروجی افشانه با کارکرد ۷۰۰ ساعت در آستانه برخورد با دیواره برای فشارهای مختلف پاشش و محفظه

همانطوری که مشاهده می‌شود افزایش فشار پاشش و فشار محفظه باعث افزایش زاویه مخروطی فواره خروجی از افشانه‌های رسوب دار با کارکردهای ۳۰۰ و ۷۰۰ ساعت می‌شود.

^۱ Turbulent

۴- نتیجه گیری

رسوبات حاصل از پدیده رسوب نشینی در نوک افشانه‌های افشانه اثرات بسیار مخربی بر رفتار مطلوب فواره خروجی سوخت دارند. مشخصه‌های فواره سوخت سهم مهمی در مولفه‌های عملکردی موتورهای احتراق داخلی شامل توان، گشتاور و مصرف سوخت دارند. لذا در این پژوهش به تحلیل و بررسی مشخصه‌های تأثیرگذار فواره شامل طول نفوذ، زاویه مخروطی، سطح مقطع تصویر شده و سرعت متوسط فواره خروجی از افشانه‌ها با کارکردهای مختلف پرداخته شده است.

بدین منظور تصاویر پیشروی فواره در فشارهای مختلف پاشش سوخت و محفظه و کارکردهای متفاوت افشانه‌ها با برنامه متلب آماده شده، تحلیل شد. همچنین جهت تحلیل کامل ساختار رسوبات و بررسی بیشتر اثرات برهمکنش رسوبات بر جریان سوخت افشانه، از روش‌های غیر مخرب میکروسکوپی نوری SEM و EDX استفاده شده است.

با افزایش زمان کارکرد افشانه به تدریج بر مقدار رسوبات سطح نوک افشانه و دهانه روزنه نوک افشانه مورد نظر افزوده می‌شود. بر اساس عکس‌های SEM گرفته شده از نوک افشانه در کارکردهای ۳۰۰ و ۷۰۰ ساعت افشانه، رسوبات در حدود ۲۰ و ۴۰ درصد از سطح دهانه روزنه مورد نظر را در بر می‌گیرند.

برای افشانه‌ها با کارکردهای ۳۰۰ و ۷۰۰ ساعت و فشار پاشش ۵۰۰ بار، مقدار کاهش سطح مقطع فواره به ترتیب ۸ و ۱۷ درصد است. با افزایش فشار پاشش تا ۱۵۰۰ بار از مقدار افت سطح مقطع فواره کاسته شده و به مقادیر ۴ و ۱۳ درصد در کارکردهای ذکر شده می‌رسد.

طول نفوذ فواره برای افشانه‌ها با کارکردهای ۳۰۰ و ۷۰۰ ساعت به ترتیب کاهش ۸ و ۱۴ درصدی را در فشار پاشش ۵۰۰ بار نشان می‌دهد. با افزایش فشار پاشش و افزایش قدرت نفوذ فواره خروجی، از سهم رسوبات افشانه در کاهش توان نفوذ فواره کاسته شده و در فشار ۱۵۰۰ بار نمودارهای طول نفوذ فواره برای افشانه‌ها با کارکردهای مختلف تقریباً منطبق بر هم خواهد بود.

برخورد جریان سوخت با رسوبات مجرای نوک افشانه منجر به اتلاف انرژی جنبشی جریان و کاهش سرعت فواره خروجی از افشانه می‌شود که با افزایش مقدار رسوبات افشانه، افت سرعت فواره نیز تشدید خواهد شد. از طرفی با افزایش فشار پاشش، جریان سوخت قویتری از میان رسوبات تشکیل شده عبور و مقدار افت سرعت فواره کاهش می‌یابد.

تشکر و قدردانی

نویسندگان این مقاله مراتب تشکر و قدردانی خود را از شرکت تحقیق و طراحی و تولید موتور ایران خودرو (اییکو) به جهت حمایت مالی و در اختیار قرار دادن امکانات آزمایشگاهی اعلام می‌دارند.

زیرنویس‌ها

amb

محیط

علائم

<i>A</i>	سطح فواره، mm^2
<i>d</i>	قطر سوراخ افشانه، mm
<i>Pamb</i>	فشار محیط (محفظه)، bar
<i>S</i>	عمق نفوذ فواره، mm
<i>Pinj</i>	فشار پاشش سوخت، bar
<i>t</i>	زمان، ms
<i>U</i>	سرعت لبه فواره، m/s
<i>Tr</i>	حد آستانه

علائم یونانی

ρ	چگالی سوخت، kg/m^3
θ	زاویه مخروطی فواره، deg

مراجع و منابع

- [1] A. Birgel, N. Ladommatos, P. Aleiferis, S. Zülch, N. Milovanovic, V. Lafon, A. Orlovic, P. Lacey, and P. Richards, Deposit Formation in the Holes of Diesel Injector Nozzles: A Critical Review, SAE, 2008-01-2383, 2008
- [2] D. Siebers, and B. Higgins, Flame Lift-Off on Direct-Injection Diesel Sprays Under Quiescent Conditions, SAE, 2001-01-0530, 2001
- [3] B. Argueyrolles, S. Dehoux, P. Gastaldi, L. Grosjean, F. Levy, A. Michel, and D. Passerel, Influence of injector nozzle design and cavitation on coking phenomenon, SAE, 2007-01-1896, 2007
- [4] R. Stanly, G. Parameswaran, and R. Rajkiran, Effect of Fuel System Coking on Vehicle Performance and Spray Field, SAE, 2017-01-5017, 2017
- [5] H. Song, J. Xiao, Y. Chen, and Z. Huang, The effects of deposits on spray behaviors of a gasoline direct injector, Fuel, Vol. 180, pp. 506–513, 2016
- [6] B. Wang, T. Badawy, Y. Jiang, H. Xu, A. Ghafourian, and X. Zhang, Investigation of deposit effect on multi-hole injector spray characteristics and air/fuel mixing process, Fuel, Vol. 191, pp. 10–24, 2017
- [7] J. Zhou, Y. Pei, Z. Peng, Y. Zhang, J. Qin, L. Wang, C. Liu, and X. Zhang, Characteristics of near-nozzle spray development from a fouled GDI injector, Fuel, Vol. 219, pp. 17–29, 2018
- [8] P. Napolitano, Ch. Guido, C. Beatrice, and C. Ciaravino, Analysis of Nozzle Coking Impact on Emissions and Performance of a Euro5 Automotive Diesel Engine, SAE, 2013-24-0127, 2013
- [9] A. Montanaro, and L. Allocca, Impact of the Nozzle Coking on Spray Formation for Diesel Injectors, SAE, 2013-01-2546, 2013
- [10] P. Risberg, L. Adlercreutz, M. Aguilera, T. Johansson, L. Stensiö, and H. Angstrom, Development

[13] J. Canny, A computational approach to edge detection, IEEE Trans Pattern Anal Mach Intell, Vol. 8, No. 6, pp. 679-698, 1986

[14] A. Hajjalimohammadi, D. Honnery, A. Abdullah, and M. AghaMirsalim, Sensitivity analysis of parameters affecting image processing of high pressure gaseous jet images, The Journal of Engine Research, Vol. 33, pp. 43-52, 2014

of a Heavy Duty Nozzle Coking Test, SAE, 2013-01-2674, 2013

[11] C. Peters, H. Beermann, Thermal shock test, AVL SCHRICK Test Procedure, PREBGTEI-2009-91, pp. 1-5, 2009

[12] A. Hajjalimohammadi, D. Honnery, A. Abdullah, and M. AghaMirsalim, Time resolved characteristics of gaseous jet injected by a group-hole nozzle, Fuel, Vol. 113, pp. 497-505, 2013



Experimental study of the diesel injector nozzle sediment effect on fuel spray behavior

M. Sheykhvazayefi ^{1*}, M. Gorji-Bandpy ², A. Hajialimohammadi ³, M. A. Mirsalim ⁴

¹ Mechanical Engineering Department, Babol University of Technology, Babol, Iran, meysam.vazayefi@stu.nit.ac.ir

² Mechanical Engineering Department, Babol University of Technology, Babol, Iran, gorji@nit.ac.ir

³ Mechanical Engineering Department, Semnan University, Semnan, Iran, ahajiali@semnan.ac.ir

⁴ Mechanical Engineering Department, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran, mirsalim@csr.ir

*Corresponding Author

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 21 September 2019

Accepted: 8 December 2019

Keywords:

Fouled injector

Nozzle hole

Fuel spray

ABSTRACT

High-pressure amount of fuel in new generation diesel engines' injector equipped with multiple and small nozzle holes has created significant improvement in the outgoing spray behavior and engine performance. On the other hand, poor fuel quality and injector nozzle embedded in high temperature combustion chamber form fundamental deposits on the nozzle leading to fuel spray inappropriate behavior. Regarding the engine functional characteristics close correlation with fuel outlet spray behavior, in this study, the destructive effects of the fuel flow interaction with injectors nozzle sediment have been analyzed in terms of injector different operating time. The deposition process of injectors is carried out with standard fuel under specified experimental circumstances. Nondestructive electron microscopy methods have been used to analyze the sediment characteristics formed on the injector's nozzle. In order to analyze the outlet fuel spray characteristics, the spray evolution images of injectors with different operating time are processed by the code provided in MATLAB software at different pressures of the constant volume chamber and fuel injection. The imaging process was carried out in a constant volume chamber with a high-speed camera. The injector deposits intensification increases the fuel injection delay and deteriorates the injector outlet spray behavior. The spray deposits destructive effects are alleviated through increasing the fuel injection pressure.

