



روشی جدید در تعیین هندسه، شار جرمی و ضریب تخلیه افشانه تزریق مستقیم گاز

ایمان عرفان^۱، مسعود ضیابشرحق^{۲*}، علیرضا حاجی علی محمدی^۳، ایمان چیت‌ساز^۴

^۱دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران، ierfan@mail.kntu.ac.ir

^۲دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران، mzia@kntu.ac.ir

^۳شرکت تحقیق، طراحی و تولید موتور ایران خودرو (ایپکو)، تهران، ایران، a_hajiali@aut.ac.ir

^۴شرکت تحقیق، طراحی و تولید موتور ایران خودرو (ایپکو)، تهران، ایران، i_chitsaz@ip-co.com

*نویسنده مسئول، شماره تماس: ۰۹۱۳۱۹۵۱۸۷۵

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

دریافت: ۰۲ آذر ۱۳۹۲

پذیرش: ۰۸ بهمن ۱۳۹۲

کلیدواژه‌ها:

افشانه

موتور

تزریق مستقیم

پردازش تصویر

ضریب تخلیه

چکیده

هندسه سوراخ‌های خروجی افشانه (قطر، زاویه، صافی سطح و ضریب مخروطی بودن سوراخ‌ها) و ضریب تخلیه جریان در خروجی افشانه، تأثیر تعیین کننده‌ای در شکل‌گیری مخلوط و احتراق در موتورهای تزریق مستقیم گاز دارند. در این مقاله، روشی بر مبنای قالب‌گیری سیلیکونی از سوراخ افشانه و پردازش تصاویر حاصل با استفاده از نرم افزار متلب برای تعیین قطر و زاویه سوراخ دهانه افشانه ارائه شده است. همچنین با طراحی میز آزمون، روشی برای اندازه‌گیری شار جرمی گاز طبیعی فشرده خروجی از افشانه تزریق مستقیم تک سوراخ به طور تجربی با استفاده از قانون فشار جزئی دالتون پیشنهاد شد. آزمون‌ها در محفظه احتراقی حجم ثابت نوری محتوی هوا با فشار ۱۵-۵ اتمسفر و گاز طبیعی فشرده به عنوان گاز تزریق با فشارهای ۳۰ و ۴۰ اتمسفر اجرا شدند. ضریب تخلیه افشانه هم با توجه به شار جرمی اندازه‌گیری شده و شار جرمی نظری برای حالت‌های مختلف فشار تزریق و محفظه احتراقی محاسبه شد. نتایج نشان داد که استفاده از روش قالب‌گیری سیلیکونی می‌تواند برای اندازه‌گیری قطر و زاویه سوراخ افشانه بکار رود و شار جرمی تجربی و ضریب تخلیه افشانه با فشار محفظه و فشار پاشش وابستگی مستقیم دارد.

تمامی حقوق برای انجمن علمی موتور ایران محفوظ است.

۱) مقدمه

در موتورهای تزریق مستقیم متغیر اساسی برای بهبود کیفیت فواره، هندسه داخلی افشانه است. این هندسه داخلی تأثیر بسیاری در گردافشانی سوخت، اختلاط هوا- سوخت و احتراق بهتر دارد. قدرت موتور، مصرف سوخت و آلایندگی به طور چشمگیری مؤثر از هندسه داخلی افشانه‌اند [۱]. دو روش پرکاربرد برای اطلاعات نقشه‌های دهانه وجود دارند: روش‌های نوری^۱ و روش‌های مخرب^۲. اطلاعات نقشه‌ها مانند زاویه مخروطی، قطر خارجی، شاخص کی^۳ و نفوذپذیری^۴ تقریباً برای سازندگان مختلف مانند شرکت بوش^۵ و شرکت زیمنس^۶ یکسانند. متغیرهای زاویه مخروطی و نفوذپذیری، به علت تعیین از طرف سازندگان موتور، باید با بیشترین دقت پیش‌بینی شوند، اما مقادیر قطر داخلی می‌تواند با مقدار موجود در نقشه‌ها تفاوت زیادی داشته باشد. اگر تجهیزات و نرم‌افزارهای کافی در دسترس باشد، روش نوری مناسب است، اما این روش نمی‌تواند هندسه داخلی دهانه را کاملاً مشخص کند. علاوه بر روش نوری، با روش مخرب برش دهانه می‌توان ابعاد داخلی افشانه را اندازه‌گیری نمود [۲].

ماسیان و همکاران^۷ [۲] مشخصات هندسی و خصوصیات سطح داخلی افشانه دیزل را برای تعیین کیفیت ساخت افشانه و دقت فرآیند ساخت افشانه با استفاده از چسب سیلیکون یافتند.

پیری و همکاران^۸ [۳] برای بررسی اثر حفره‌زایی روی رفتار فواره دیزل و تعیین عملکرد دهانه دیزل، نرخ شار جرمی سوخت پاشیده شده به ازای یک پاشش را به دست آورده‌اند [۴]. در این روش، ابتدا منحنی نرخ خروجی پاشش را نمایشگری نشان می‌دهد. این نمایشگر، اطلاعات پاشش سوخت، در طول زمان پاشش را ثبت می‌کند. مبنای اندازه‌گیری در این وسیله، روش شرکت بوش است. در این روش افشانه، سوخت را به درون یک لوله اندازه‌گیری پر از سوخت تزریق می‌کند. خروج سوخت سبب افزایش فشار در درون لوله می‌شود. این افزایش فشار متناسب با افزایش در جرم سوخت و نرخ این افزایش فشار متناظر با نرخ پاشش است. حسگر فشار این افزایش فشار را نمایش می‌دهد و سپس اطلاعات پردازش می‌شوند.

در روش اندازه‌گیری زئوچ^۹ [۵] معیار نرخ پاشش را تغییر طول پیمایش سمبه تعیین می‌کند، که تغییر طول پیمایش در اثر نیروی فواره پاشش سوخت است.

بوور و فوستر^{۱۰} [۶] روش‌های اندازه‌گیری بوش و زئوچ را با یکدیگر مقایسه کردند. آنها از سامانه پاشش انباشتگر فشار قوی و افشانه تک سوراخ در بسامدها و مقادیر بزرگ استفاده کردند (۴۵-۱۰۰ میلی‌متر مکعب در هر پاشش). الگوی نرخ پاشش در سامانه پاشش انباشتگر سبب شد که بتوان مقایسه‌ای مناسب برای اندازه‌گیری جریان پایا بین دو روش انجام داد.

آنها همچنین روش‌های اندازه‌گیری نرخ پاشش زئوچ و بوش برای سرعت‌های تلمبه دوار ۱۰۰۰ تا ۲۰۰۰ دور بر دقیقه و بارهای در حدود ۵۰ میلی‌متر مکعب در هر پاشش را مقایسه کرده‌اند. مارکیک^{۱۱} [۷]، دستگاهی برای اندازه‌گیری نرخ پاشش جریان از افشانه دیزل را معرفی کرده است. فشار اندازه‌گیری شده در ورودی افشانه ۴۰۰ بار است. سایش سوخت در سامانه تزریق سوخت سبب ایجاد اختلاف دما در قطب‌های حسگر این دستگاه می‌شود و بار برقی حاصل را تقویت کننده به جریان برق تبدیل می‌کند. در نهایت مقدار متوسط نرخ پاشش را تقویت کننده اندازه‌گیری می‌کند.

پاشلی^{۱۲} و استون^{۱۳} [۸] روشی برای پیش‌بینی بیشترین نرخ جریان افشانه سوخت مایع با استفاده از سوخت گازی را ارائه دادند. آزمون‌ها با استفاده از سه افشانه مختلف و چهار نوع سوخت گازی (هوا، نیتروژن، هیدروژن و هلیوم) انجام شد. آنها از فرضیه جریان تراکم‌پذیر برای بی‌بعدسازی نتایج استفاده کردند و عملکرد افشانه‌ها را برای مخلوط‌ها و گازهای دیگر پیش‌بینی کردند.

باثرت و کلاسن [۹] با سه نسبت فشار پاشش به فشار محفظه و سه قطر متفاوت افشانه، پاشش گاز به داخل محفظه را بررسی کردند. به دلایل ایمنی گاز نیتروژن، به عنوان گاز پاشش و گاز داخل محفظه در نظر گرفته شد. آنها سرعت و عمق نفوذ فواره حاصل را با روش تشخیص نور^{۱۴} محاسبه نمودند. علاوه بر این با استفاده از افزایش فشار محفظه و فرض قانون گاز کامل، شار جرمی ورودی به محفظه محاسبه شد.

در این مقاله، روش‌هایی برای اندازه‌گیری قطر و زاویه سوراخ دهانه افشانه و شار خروجی گاز طبیعی فشرده از افشانه تزریق مستقیم ارائه شده است. اطلاعات به دست آمده می‌توانند برای تعیین مشخصات افشانه تولیدی و مقایسه آن با مقادیر گزارش شده شرکت سازنده استفاده شود. مهندسی معکوس افشانه در زمانی که از مشخصات فنی اطلاعی در دسترس نیست، کاربردهای دیگر نتایج و روش‌های پیشنهادی این مقاله‌اند.

1 Optical techniques

2 Destructive techniques

3 K-factor

4 Permeability

5 Bosch

6 Siemens

7 Macian et al.

8 Payri et al.

9 Zeuch

10 Bower and Foster

11 Marcic

12 Pashley

13 Stone

14 Laser

سیلیکون به علت چسبندگی زیاد، مقاومت شدید در برابر درجه حرارت و حفظ حالت لاستیکی خود بهترین رها ساز قالبی به شمار می‌رود. بنابراین برای ساخت نمونه مشابه با افشانه، از چسب سیلیکون استفاده شد.

در گام اول به منظور این که بتوان چسب سیلیکون را در داخل دهانه افشانه ریخت، قطعات افشانه بوش از یکدیگر جدا گردید. اجزای داخلی تشکیل دهنده افشانه تزریق مستقیم بوش در حالت جدا شده از یکدیگر در شکل ۲ نشان داده شده است.

چون کلیه اجزاء تشکیل دهنده این افشانه به صورت کاملاً فشرده (پرس) شده، هستند؛ بدنه افشانه با برشکاری به دو قسمت مجزا تقسیم شد. سپس سوزن افشانه جدا شده و در نهایت قسمت استوانه‌ای بدنه افشانه، خالی شد. در این مرحله از تمییزی قسمت استوانه‌ای بدنه افشانه اطمینان حاصل شد، زیرا وجود هر گونه گرد و خاک یا قطره بنزین از چسبندگی سیلیکون به داخل افشانه جلوگیری می‌کند. سپس با استفاده از یک واسط ارتجاعی که در داخل قسمت استوانه‌ای افشانه قرار گرفت، سیلیکون به آرامی به داخل افشانه ریخته شد، افشانه حاوی چسب چند روز در محیط بدون لرزش و جابجایی قرار گرفت. پس از چند روز که سیلیکون موجود در افشانه شکل افشانه را به خود گرفت از داخل افشانه بیرون کشیده شد و برای تعیین مشخصات هندسی افشانه، نمونه سیلیکونی حاصل مطالعه شد.

در گام دوم، با استفاده از دوربین و تصویرنما^۴ با بزرگنمایی بین ۱۶ تا ۳۰ برابر، تصاویر مختلفی از نمونه سیلیکونی افشانه، گرفته شد. نماهای گوناگون نمونه سیلیکونی در شکل ۳ نشان داده شده است. در گام سوم مشخصات هندسی افشانه با روش پردازش تصویر، بر روی تصویر عکسبرداری شده از نمای بالای نمونه سیلیکونی حاصل شد. این تصویر در شکل ۴ نشان داده شده است.



شکل ۱: افشانه تک سوراخ بوش

این تحقیق به دو بخش اصلی تقسیم شده است: در بخش اول، روش تعیین مشخصات هندسی افشانه بتفصیل شرح داده می‌شود. تعیین مشخصات هندسی افشانه بر پایه استفاده از نمونه سیلیکونی از افشانه است. از این نمونه با بزرگنمایی عکسبرداری و تصاویر آن پردازش می‌شود.

در بخش دوم، روش و نتایج اندازه‌گیری شار جرمی گاز توضیح داده می‌شود. در میز آزمون، گاز طبیعی فشرده به داخل محفظه حجم ثابت پاشیده می‌شود و با افزایش فشار ناشی از این پاشش شار، جرمی گاز محاسبه می‌گردد.

۲) نمونه سیلیکونی، عکسبرداری و تحلیل تصاویر ۲-۱) طراحی آزمایش

مدت زمان تزریق را در شرایط کاری مختلف موتور بر اساس شار افشانه واحد مدیریت هوشمند موتور^۱ تعیین می‌کند. اندازه‌گیری دقیق شار جرمی افشانه می‌تواند به زینبندی دقیق‌تر و عملکرد بهینه موتور کمک کند. بر اساس وابستگی بین شار افشانه، عمق نفوذ و زاویه فواره می‌توان از شار دقیق افشانه اطلاع یافت. همچنین می‌توان معادله‌ای نظری بین خصوصیات کلان^۲ فواره مانند عمق نفوذ و سرعت لبه بر حسب زمان پیدا کرد.

آزمون‌های انجام شده در محفظه احتراقی حجم ثابت با استفاده از افشانه تزریق درگاهی موتور ملی EF7 (افشانه مدل NG12 شرکت بوش) نشان داد که در موتور تزریق مستقیم، به دلیل پاشش در مرحله تراکم، نمی‌توان از این نوع از افشانه استفاده کرد، زیرا سوزن افشانه توانایی بالا آمدن و عبور جریان گاز در حالت فشار پاشش بیشتر از ۷ بار را ندارد و همچنین فشار قوی محفظه نیز سبب باز شدن افشانه و برگشت هوای موجود در محفظه به خط پاشش گاز طبیعی می‌شود. همچنین به علت اینکه در حال حاضر افشانه تزریق مستقیم گاز در مقیاس صنعتی وجود ندارد و این نوع افشانه فقط در مقیاس آزمایشگاهی است. بنابراین از افشانه تزریق مستقیم بنزینی تک سوراخ بوش به کار رفته در موتور خودروی آئودی^۳، استفاده شده است. افشانه آزمون، در شکل ۱ نشان داده شده است.

برای تعیین مشخصات هندسی افشانه سه گام اساسی وجود دارد که بتفصیل شرح داده خواهند شد.

۱. ساخت نمونه مشابه
۲. عکسبرداری از نمونه مشابه
۳. تعیین مشخصات هندسی با روش‌های مختلف

1 Electronic Control Unit (ECU)

2 Macroscopic

3 Audi

4 Stereoscope

۲-۲) مشخصات هندسی از روش پردازش تصویر

در شکل ۵ مراحل روش پردازش و تعیین اندازه‌های موجود در تصویر ارائه شده است:

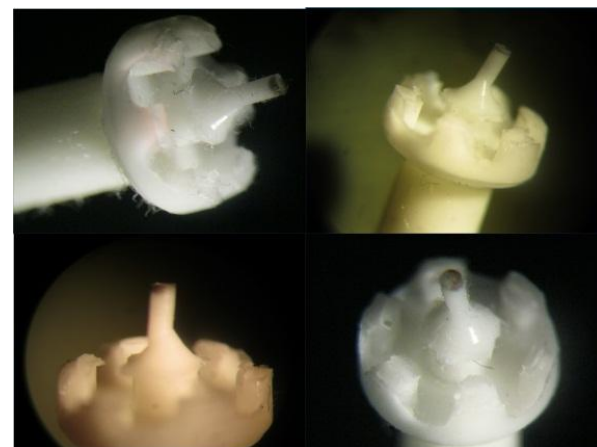
مرحله اول: تصویر در نرم‌افزار MATLAB فراخوانی شد.

مرحله دوم: با استفاده از روش کنی^۱ از تصویر مورد نظر لبه‌گیری شد. روش کنی با استفاده از مشتق‌گیری صافی گاوسی، لبه‌ها را با یافتن بیشترین تغییر محلی در تصویر پیدا می‌کند [۱۰]. این روش از دو حد آستانه برای یافتن لبه‌های ضعیف و قوی استفاده می‌کند. این روش بیشتر از سایر روش‌ها توانایی تشخیص لبه‌های ضعیف را دارد و برخلاف سایرین (مثل سوبل^۲ و پرویت^۳)، با وجود خش، در تشخیص لبه‌ها اشتباه نمی‌کند. بعلاوه این روش در تشخیص لبه‌های ضعیف عملکرد مناسبی دارد.

مرحله سوم: بر روی تصویر لبه‌گیری شده، عملیات شناخت شکل و کیفیت سطح^۴ اعمال شد. عملیات شناخت شکل و کیفیت سطح، مجموعه‌ای از اعمال پردازش تصویر است که تصاویر را بر اساس شکل‌ها پردازش می‌کند. این اعمال بر روی تصاویر دودویی لحاظ می‌شود. در عملیات شناخت شکل و کیفیت سطح با استفاده از اعمال یک عضو ساختاری بر روی تصویر ورودی، تصویری خروجی با همان اندازه ایجاد می‌شود. عضو ساختاری، ماتریسی است شامل صفر و یک، که می‌تواند هر شکل (مانند مربع، لوزی، دایره) و اندازه‌ای داشته باشد. در عملیات شناخت شکل و کیفیت سطح، مقدار هر جزء^۵ در تصویر خروجی بر اساس مقایسه جزء متناظر در تصویر ورودی با اجزاء مجاور است. پایه‌ای‌ترین اعمال شناخت شکل و کیفیت سطح انبساط^۶، ساییدگی^۷، باز کردن و بستن اند. انبساط عملیاتی است که در هنگام آن اشیاء در یک تصویر دودویی رشد می‌کنند و یا به اصطلاح ضخیم‌تر می‌شوند. رفتار و اندازه این روال ضخیم شدن با توجه به عنصر ساختاری پایش می‌شود. ساییدگی برای کوتاه کردن یا نازک کردن اشیاء در تصویر دودویی بکار می‌رود. رفتار و نحوه عملکرد آن توسط عضو ساختاری تعیین می‌گردد. انبساط مؤلفه‌های تصویر را بسط می‌دهد و ساییدگی آن‌ها را کوچک می‌کند. باز کردن، معمولاً منحنی‌شده را هموار می‌کند، باریک‌ها را می‌شکند و برآمدگی‌های نازک را حذف می‌کند. بستن نیز تمایل به هموار کردن بخش‌هایی از منحنی‌ها را دارد، اما برخلاف باز کردن معمولاً شکستگی‌های باریک و شکاف‌های نازک را می‌سوزاند، سوراخ‌های کوچک را حذف و فاصله‌های موجود در منحنی را پر می‌کند [۱۱]. با استفاده از عملیات شناخت شکل و کیفیت سطح، کیفیت بعضی از



شکل ۲: نمای از افشانه با قطعات جدا شده از یکدیگر



شکل ۳: تصویر از نماهای مختلف نمونه سیلیکونی



شکل ۴: نمای بالای افشانه

1 Canny

2 Sobel

3 Prewitt

4 Morphological operations

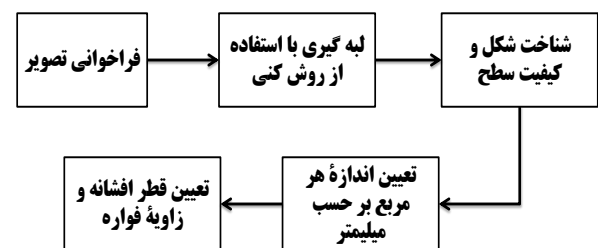
5 Pixel

6 Dilation

7 Erosion

اجزاء با وضوح ضعیف در روی لبه دهانه افشانه، تضعیف و حداقل می‌شود. همچنین کیفیت اجزاء با وضوح قوی روی لبه دهانه افشانه که برای محاسبه قطر و زاویه دهانه افشانه لازم بود، تقویت می‌شود و به حداکثر می‌رسد. این اعمال پس از لبه‌گیری از تصویر باعث شناسایی دقیق‌تر اجزاء با حداکثر شدت می‌شود و در نتیجه خطای ممکن در محاسبه مشخصات هندسی افشانه با استفاده از اندازه هر جزء را در پردازش تصویر به حداقل می‌رساند.

مرحله چهارم: در آخر با توجه به اندازه واقعی قطر بدنه نمونه سیلیکونی که با ابزار دقیق اندازه‌گیری شد، مطابقت آن با تعداد اجزاء موجود در تصویر، اندازه قطر افشانه و زاویه دهانه افشانه به دست آمد. شکل ۶: روند پردازش تصویر را بوضوح نشان می‌دهد.



شکل ۵: روش پردازش تصویر

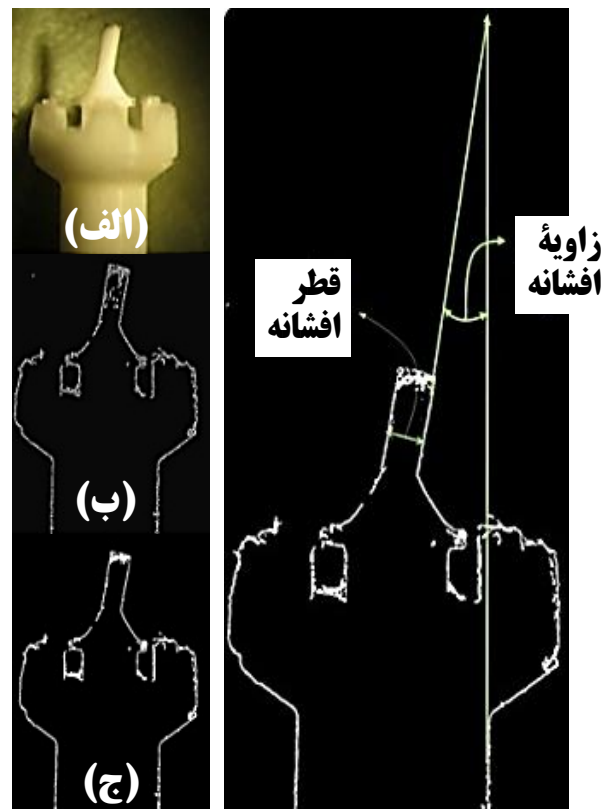
۳) آزمون تجربی و میز آزمون برای محاسبه شار جرمی و ضریب تخلیه

۳-۱) محاسبه شار جرمی

در این بخش با استفاده از میز آزمون مقادیر شار جرمی افشانه حاصل شد. شکل ۷ تصویر نمادین از چیدمان آزمایش برای محاسبه شار جرمی افشانه را نشان می‌دهد.

مطابق شکل ۸، محفظه حجم ثابت، محفظه‌ای نوری با قطر و ارتفاع ۱۳ سانتی‌متر است که در دو وجه بالا و پایین آن شیشه‌های شفاف با ضخامت ۸ سانتی‌متر و قطر ۱۶ سانتی‌متر از جنس کوارتز قرار گرفته است. از این شیشه‌های نوری ضخیم، می‌توان پاشش و احتراق سوخت‌های مختلف را در این محفظه مشاهده نمود. این محفظه قابلیت تحمل فشار را تا ۱۰۰ اتمسفر دارد [۱۲]. افشانه تزریق مستقیم تک سوراخ بوش روی این محفظه جانمایی شد. قبل از اجرای هر آزمون از عدم نشتی محفظه اطمینان حاصل شد.

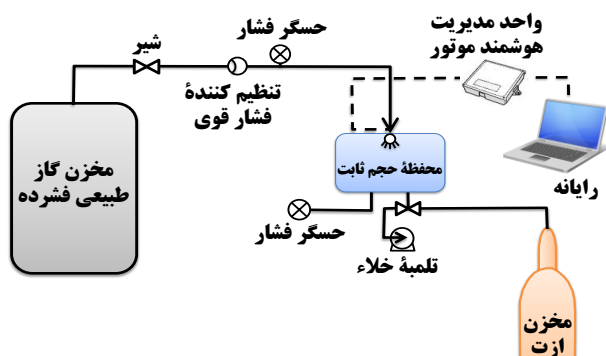
در ابتدا محفظه با استفاده از تلمبه خلاء تا فشار ۱۰۰۰ پاسکال تخلیه شد. سپس محفظه از هوا با فشار مشخص پر شد. تنظیم‌کننده و حسگر فشار موجود در مسیر جریان گاز طبیعی فشرده، فشار پاشش را تنظیم می‌کردند. در ادامه با استفاده از سخت‌افزار مدیریت هوشمند موتور به افشانه تزریق مستقیم تک سوراخ بوش، فرمان پاشش داده شد. زمان پاشش ۲۰ میلی‌ثانیه در نظر گرفته شد. سپس گاز طبیعی به داخل محفظه پاشیده شد. چون جرم هر پاشش گاز ناچیز است، در هر آزمون ده بار پاشش انجام شد و متوسط افزایش فشار ده بار پاشش، به عنوان افزایش فشار هر پاشش گاز در نظر گرفته شد.



شکل ۶: پردازش تصویر نمونه سیلیکونی: (الف): فراخوانی تصویر در MATLAB، (ب): لبه‌گیری با روش کنی، (ج): عملیات شناخت شکل و کیفیت سطح، (د): تعیین قطر افشانه و زاویه دهانه افشانه (بخش د شامل عکس سمت راستی است).

جدول ۱: نتایج مشخصات هندسی افشانه

قطر افشانه (میلی‌متر)	۰.۶۶
زاویه دهانه افشانه (درجه)	۱۰.۶۹



شکل ۷: نمای چیدمان میز آزمون اندازه‌گیری شار جرمی

جدول ۲: خواص هوای داخل محفظه

دمای داخل محفظه (درجه سانتیگراد)	فشار هوای داخل محفظة (بار)	ضریب تراکم‌پذیری هوای داخل محفظه
۲۲.۴	۵	۱
۲۲.۴	۱۵	۰.۹۹۷

جدول ۳: ترکیب گاز طبیعی فشرده

کسر مولی	گاز
۰.۸۸۱۶	CH_4
۰.۰۴۸۲	C_2H_6
۰.۰۱۲۸	C_3H_8
۰.۰۰۵۷۴	C_4H_{10}
۰.۰۰۱۲۶	C_5H_{12}
۰.۰۰۰۳۲۸	C_6H_{14}
۰.۰۰۶۴	CO_2
۰.۰۴۳۶	N_2

ترکیب این گاز طبیعی فشرده از آزمایشگاه سوخت و احتراق مرکز تحقیق، طراحی و تولید موتور ایران خودرو (IPCO) اخذ شد.

$$y_i = \frac{P_i}{P_{mix}} = \frac{N_i}{N_{mix}} \quad (۱)$$

$$M_{mix} = y_{CNG} M_{CNG} + y_{air} M_{air} \quad (۲)$$

$$\bar{R} = 8.314 \frac{kJ}{kmol.K} \quad \text{و} \quad R_{mix} = \frac{\bar{R}}{M_{mix}} \quad (۳)$$

$$P_{mix} = P_{air} + P_{CNG} \quad (۴)$$

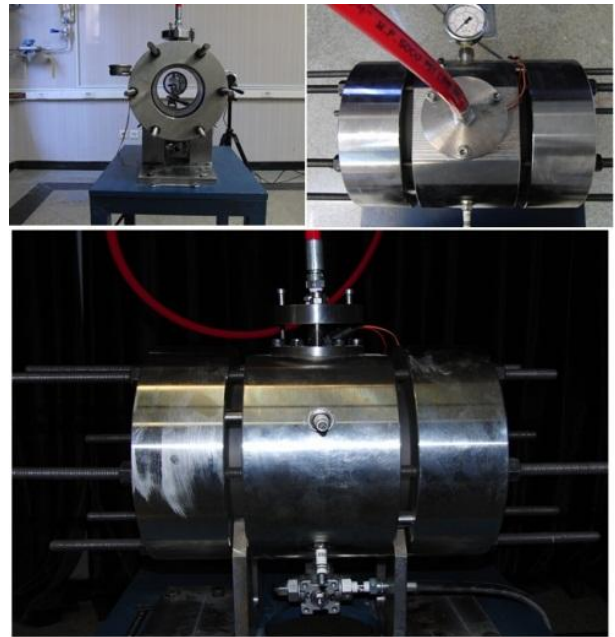
$$m_{air} = \frac{P_{air} V}{R_{air} T_{air}} \quad (۵)$$

$$m_{mix} = \frac{P_{mix} V}{R_{mix} T_{mix}} \quad (۶)$$

$$m_{CNG} = m_{mix} - m_{air} \quad (۷)$$

$$\dot{m}_{CNG} = \frac{m_{CNG}}{t_{inj}} \quad (۸)$$

که M_{mix} جرم مولکولی مخلوط گاز طبیعی و هوا، y_{CNG} کسر مولی گاز طبیعی فشرده در مخلوط، M_{CNG} جرم مولکولی گاز طبیعی فشرده، y_{air} کسر مولی هوا در مخلوط، M_{air} جرم مولکولی هوا، R_{mix} ثابت مخلوط گاز طبیعی و هوا، P_{mix} فشار مخلوط، P_{air} فشار جزئی هوا، P_{CNG} فشار جزئی گاز طبیعی، m_{air} جرم هوای موجود در محفظه، m_{mix} جرم مخلوط گاز طبیعی و هوا،



شکل ۸: نمایی از محفظه حجم ثابت

حسگری با نام تجاری بی‌دی^۱ با قابلیت اندازه‌گیری فشار در بازه صفر تا ۲۵ اتمسفر، برای اندازه‌گیری فشار محفظه بکار رفت. نمایشگر فشار، با نام تجاری کاموس، نوع CA PC 2R، این مقدار فشار را اندازه‌گیری می‌کند [۱۳].

برای اطمینان از این که بتوان از فرض گاز کامل برای محاسبه شار جرمی گاز طبیعی پاشیده شده به داخل محفظه استفاده کرد، باید ضریب تراکم‌پذیری هوای موجود در محفظه محاسبه شود. بنابراین با استفاده از دما و فشار محفظه و خواص بحرانی هوا، کاهیده (نسبت دما به دمای بحرانی) و فشار کاهیده (نسبت فشار به فشار بحرانی) به دست آمد. در آخر، ضریب تراکم‌پذیری از روی نمودار ضریب تراکم‌پذیری برحسب فشار و دمای کاهیده مطابق جدول ۲ حاصل شد. ضریب تراکم‌پذیری در فشار ۵ و ۱۵ بار بترتیب برابر ۱ و ۰.۹۹۷ به دست آمد. این مقادیر بیان می‌کنند که می‌توان هوای داخل محفظه را کامل فرض کرد. در این صورت با توجه به همدامی و هم حجم بودن هوا و گاز طبیعی فشرده و کامل بودن آنها می‌توان از قانون دالتون برای محاسبه شار جرمی استفاده کرد. بعلاوه دمای هوای داخل محفظه و دمای مخلوط هر دو برابر ۲۲.۴ درجه سانتیگراد است. طبق قانون دالتون در صورتی که هر گاز در دما و حجم مخلوط باشد، فشار یک مخلوط گازی برابر مجموع فشارهای هر گاز است [۱۴]. معادلات محاسبه شار جرمی در ادامه آورده شده است. ترکیب گاز طبیعی فشرده در جدول ۳ آمده است.

² Irankhodro Powertrain Company (IPCO)

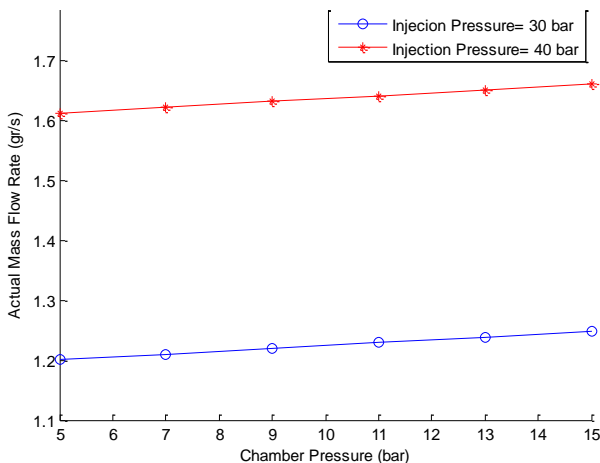
¹ BD Sensors

که P_{ch} فشار محفظه، C_d ضریب تخلیه، \dot{m}_{actual} شار جرمی واقعی (تجربی)، \dot{m}_{ideal} شار جرمی کامل، V^* و ρ^* سرعت و چگالی در شرایط خفگی است. علامت * نشانگر شرایط خفگی و زیرنویس ۰ نشانگر شرایط سکون اند [۱۵ و ۱۶].

۴ نتایج

در جدول ۴ نتایج شار جرمی افشانه و ضریب تخلیه نشان داده شده است. معادله‌های (۱۲-۱۷) نشان می‌دهند که به علت خفگی سیال در دهانه خروجی، شار جرمی عبوری از دهانه افشانه مقداری ثابت و بیشینه است. اما نتایج شار جرمی تجربی نشان می‌دهد که با افزایش فشار محفظه، شار جرمی افزایش بسیار ناچیز دارد. نوسان سوزن افشانه در هنگام باز و بسته شدن، سبب تغییر سطح مقطع دهانه افشانه و در نتیجه تغییر بسیار ناچیز در شار جرمی تجربی شده است. همان گونه که در شکل ۹ نشان داده شده است، با افزایش فشار پاشش، شار جرمی واقعی گاز طبیعی نیز افزایش می‌یابد. همچنین افزایش فشار محفظه سبب افزایش جزئی در شار جرمی واقعی گاز طبیعی شده می‌شود.

شکل ۱۰ و ۱۱ مقایسه شار جرمی واقعی و شار جرمی کامل را نشان می‌دهند. با توجه به آنها مشخص می‌شود که در فشارهای مختلف محفظه، شار جرمی واقعی کمتر از شار جرمی کامل است. این در حالی است که شار جرمی کامل در فشارهای مختلف محفظه، ثابت است. تفاوت بین مقادیر نظری و تجربی به دلیل مدت زمان باز و بست سوزن افشانه و انحراف حالت واقعی از فرض بازگشت‌پذیری بی‌دررو^۱ است. مطابق شکل ۱۲، ضریب تخلیه افشانه با افزایش فشار محفظه افزایش می‌یابد. در فشار محفظه ثابت، افزایش فشار پاشش سبب افزایش ناچیز ضریب تخلیه می‌شود.



شکل ۹: شار جرمی واقعی بر حسب فشار محفظه

\dot{m}_{CNG} جرم گاز طبیعی پاشیده شده، t_{inj} زمان پاشش، شار جرمی گاز طبیعی پاشیده شده اند. با استفاده از ترکیب گاز طبیعی فشرده در جدول ۲ و معادلات (۸-۱)، جرم مولکولی و ثابت گاز طبیعی فشرده بترتیب برابر $kg/kmol$ و ۲۸.۹۰۳۲ و $۰.۲۸۷۶۵ kJ/(kmol.K)$ اند.

$$C_{p,mix} = \sum_{i=1}^k mf_i C_{p,i} = \sum_{i=1}^k y_i \frac{M_i}{M_m} C_{p,i} \quad (۹)$$

$$C_{v,mix} = \sum_{i=1}^k mf_i C_{v,i} = \sum_{i=1}^k y_i \frac{M_i}{M_m} C_{v,i} \quad (۱۰)$$

$$k_{mix} = \frac{C_{p,mix}}{C_{v,mix}} \quad (۱۱)$$

که $C_{p,mix}$ ضریب گرمای ویژه در فشار ثابت مخلوط، $C_{v,mix}$ ضریب گرمای ویژه در حجم ثابت مخلوط، mf_i کسر جرمی هر جزء در مخلوط، $C_{p,i}$ ضریب گرمای ویژه در فشار ثابت هر جزء در مخلوط، $C_{v,i}$ ضریب گرمای ویژه در حجم ثابت هر جزء در مخلوط و k_{mix} نسبت ضرایب گرمای ویژه‌ی مخلوط اند.

۳-۲ محاسبه ضریب تخلیه

با استفاده از معادله‌های (۹-۱۱) نسبت ضرایب گرمای ویژه برای گاز طبیعی فشرده با ترکیب موجود در جدول ۲ برابر ۱.۲۸۷۴ به دست آمد. با استفاده از معادله (۱۲)، نسبت فشار بحرانی برای گاز طبیعی فشرده ۰.۵۵ است. حال به این دلیل که تمام نسبت فشارها در آزمون‌های انجام شده از نسبت فشار بحرانی کمتر است. بنابراین عدد ماخ در دهانه خروجی برابر با یک است و شار عبوری از افشانه بیشترین مقدار است. برای محاسبه ضریب تخلیه، شار جرمی کامل با فرض خفگی سیال در خروجی دهانه بدین شرح محاسبه شده است:

$$\frac{P_{ch}}{P_0} \leq \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k}{k-1}} \quad (۱۲)$$

$$C_d = \frac{\dot{m}_{actual}}{\dot{m}_{ideal}} \quad (۱۳)$$

$$\begin{aligned} \dot{m}_{ideal} &= \rho^* V^* A^* \\ &= A^* P_0 \sqrt{\frac{k}{RT_0}} \left(\frac{2}{k+1}\right)^{(k+1)/[2(k-1)]} \end{aligned} \quad (۱۴)$$

$$\rho^* = \rho_0 \left(\frac{2}{k+1}\right)^{1/(k-1)} \quad (۱۵)$$

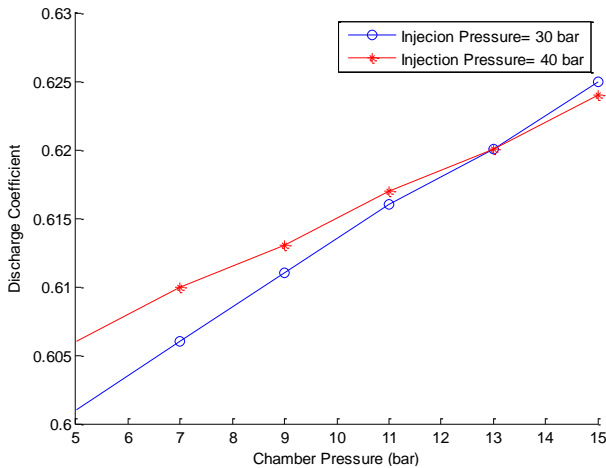
$$T^* = T_0 \left(\frac{2}{k+1}\right) \quad (۱۶)$$

$$V^* = \sqrt{kRT^*} \quad (۱۷)$$

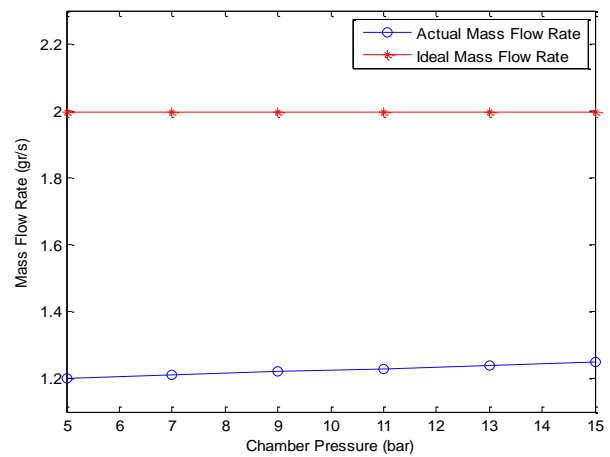
¹ Isentropic

جدول ۴: نتایج شار جرمی تجربی افشانه

ضریب تخلیه	شار جرمی کامل (گرم بر ثانیه)	شار جرمی واقعی (گرم بر ثانیه)	جرم گاز پاشیده شده (گرم)	فشار محفظه بعد از پاشش (فشار مخلوط) (بار)	فشار محفظه قبل از پاشش (فشار هوا) (بار)	فشار پاشش (بار)
۰.۶۰۱	۱,۹۹۵۱۲	۱,۲۰۰۶۵	۰,۰۲۴۰۱۲۹	۵,۰۱۸۵	۵	۳۰
۰.۶۰۶	۱,۹۹۵۱۲	۱,۲۱۰۱۹	۰,۰۲۴۲۰۳۸	۷,۰۱۸۵	۷	۳۰
۰.۶۱۱	۱,۹۹۵۱۲	۱,۲۱۹۷۳	۰,۰۲۴۳۹۴۶	۹,۰۱۸۵	۹	۳۰
۰.۶۱۶	۱,۹۹۵۱۲	۱,۲۲۹۲۷	۰,۰۲۴۵۸۵۵	۱۱,۰۱۸۵	۱۱	۳۰
۰.۶۲۰	۱,۹۹۵۱۲	۱,۲۳۸۸۲	۰,۰۲۴۷۷۶۳	۱۳,۰۱۸۵	۱۳	۳۰
۰.۶۲۵	۱,۹۹۵۱۲	۱,۲۴۸۳۶	۰,۰۲۴۹۶۷۲	۱۵,۰۱۸۵	۱۵	۳۰
۰.۶۰۶	۲,۶۶۰۱۶	۱,۶۱۳۵۷	۰,۰۳۲۲۷۱۴	۵,۰۲۵	۵	۴۰
۰.۶۱۰	۲,۶۶۰۱۶	۱,۶۲۳۱۱	۰,۰۳۲۴۶۲۲	۷,۰۲۵	۷	۴۰
۰.۶۱۳	۲,۶۶۰۱۶	۱,۶۳۲۶۵	۰,۰۳۲۶۵۲۹	۹,۰۲۵	۹	۴۰
۰.۶۱۷	۲,۶۶۰۱۶	۱,۶۴۲۱۹	۰,۰۳۲۸۴۳۷	۱۱,۰۲۵	۱۱	۴۰
۰.۶۲۰	۲,۶۶۰۱۶	۱,۶۵۱۷۲	۰,۰۳۳۰۳۴۵	۱۳,۰۲۵	۱۳	۴۰
۰.۶۲۴	۲,۶۶۰۱۶	۱,۶۶۱۲۶	۰,۰۳۳۲۲۵۳	۱۵,۰۲۵	۱۵	۴۰



شکل ۱۲: ضریب تخلیه بر حسب فشار محفظه

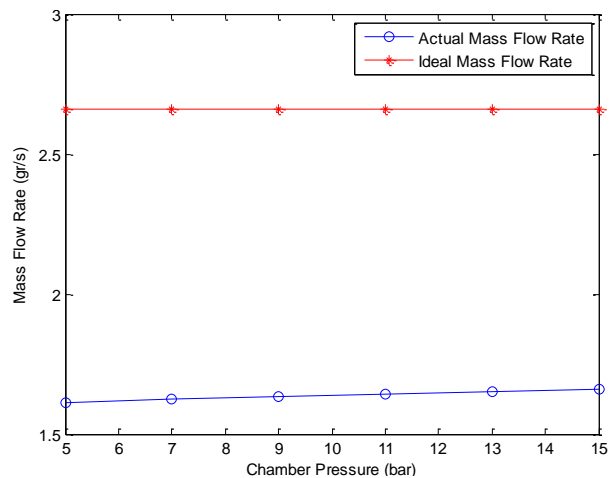


شکل ۱۰: مقایسه شار جرمی واقعی و کامل بر حسب فشار محفظه در فشار پاشش ۳۰ بار

۵ نتیجه گیری

در این مقاله روش جدیدی برای تعیین مشخصات هندسی دهانه افشانه ارائه شد. این روش بر اساس ایجاد نمونه سیلیکونی، مشابه با افشانه بوش می‌باشد. مزایای این روش، تطابق دقیق ابعادی بین نمونه سیلیکونی و افشانه بوش و دستیابی به مقادیر دقیق مشخصات هندسی افشانه می‌باشد.

میز آزمون طراحی شده برای اندازه‌گیری شار جرمی، دقت قابل قبولی دارد و نیازمند استفاده از امکانات بسیار پیشرفته نیست. شایان ذکر است که با استفاده از این میز آزمون، می‌توان شار جرمی افشانه‌های مختلف را با سوخت‌های مختلف در بازه گسترده فشارهای پاشش و محفظه به دست آورد. شار جرمی گاز طبیعی فشرده خروجی از افشانه تک سوراخ بوش در فشارهای مختلف پاشش و محفظه اندازه‌گیری شد. با افزایش فشار محفظه، شار جرمی تجربی گاز طبیعی فشرده



شکل ۱۱: مقایسه شار جرمی واقعی و کامل بر حسب فشار محفظه در فشار پاشش ۴۰ بار

- [5] W. Zeuch, Neue Verfahren zur Messung des Einspritzgesetzes und Einspritz-Regelmässigkeit von Diesel-Einspritzpumpen, MTZ, Vol. 22, No. 9, pp. 415-420, 1961
- [6] G. Bower, D.E. Foster, Data from variable rate shape high pressure injection system operating in an engine-fed constant-volume combustion chamber, SAE International, Paper No. 902082, 1990
- [7] M. Marcic, New diesel injection nozzle flow measuring device, Review of Scientific Instruments, Vol. 71, No. 4, pp. 1876-1882, 2000
- [8] N. Pashley, R. Stone, Prediction of liquid fuel injector performance with gaseous fuels, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, pp. 212-311, 1998
- [9] R. Baert, A. Klaassen, Direct injection of high pressure gas: Scaling properties of pulsed turbulent jets, SAE International, Paper No. 2010-01-2253, 2010
- [10] J. Canny, A computational approach to edge detection, Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions, Vol. 6, pp. 679-698, 1986
- [11] R.C. Gonzalez, R.E. Woods, S.L. Eddins, Digital image processing using MATLAB, Vol. 2, Gatesmark Publishing Knoxville, 2009
- [12] S.S.A. Soleymani, Designing and manufacturing of combustion constant volume chamber with optical windows, BSc Thesis, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran, 2012
- [13] www.bdsensors.com
- [14] Y.A. Cengel, M.A. Boles, M. Kanoglu, Thermodynamics: An engineering approach, Vol. 5, McGraw-Hill, New York, USA, 2011
- [15] F.M. White, Fluid mechanics, McGraw-Hill, Boston, USA, 1999
- [16] M. Chiodi, H.J. Berner, M. Bargene, Investigation on different injection strategies in a direct-injected turbocharged CNG engine, SAE International, Paper No. 2006-01-3000, 2006

افزایش می‌یابد. در فشار ثابت محفظه، با افزایش فشار پاشش، شار جرمی نیز افزایش می‌یابد.

با توجه به فشارهای پاشش، فشارهای محفظه و نسبت فشار بحرانی، بیشترین شار جرمی عبوری از دهانه در حالتی است که عدد ماخ در خروجی دهانه برابر یک شود و سیال در خروجی دهانه دچار خفگی شود. همان گونه که نشان داده شد، با افزایش فشار محفظه، ضریب تخلیه نیز افزایش می‌یابد و در فشار محفظه ثابت، ضریب تخلیه فشار پاشش بزرگتر است. بنابراین مشخصات هندسی افشانه تک سوراخ بوش (قطر افشانه و زاویه پاشش) مشخص‌کننده محل جانمایی افشانه در موتور ملی تزریق مستقیم گازسوز خواهد بود. همچنین نتایج حاصل از محاسبه شار جرمی، تعیین‌کننده زمان و مقدار پاشش به منظور دستیابی به مخلوط سوخت و هوای مناسب و احتراقی بهینه در موتور ملی گازسوز تزریق مستقیم خواهد بود.

تشکر و قدردانی

نویسندگان این مقاله، مراتب تشکر و قدردانی خود را از شرکت تحقیق، طراحی و تولید موتور ایران خودرو (اییکو) به خاطر حمایت برای اجرای این تحقیقات در آزمایشگاه نور این شرکت اعلام می‌دارند.

References

- [1] D.A. Pierpont, R.D. Reitz, Effects of injection pressure and nozzle geometry on D.I. diesel emissions and performance, SAE International, Paper No. 950604, 1995
- [2] V. Macian, V. Bermudez, R. Payri, J. Gimeno, New technique for determination of internal geometry of a diesel nozzle with the use of silicone methodology, Experimental Techniques, Vol. 27, No. 2, pp. 39-43, 2003
- [3] R. Payri, J.M. Garcia, F.J. Salvador, J. Gimeno, Using spray momentum flux measurements to understand the influence of diesel nozzle geometry on spray characteristics, Fuel, Vol. 84, No. 5, pp. 551-561, 2005
- [4] W. Bosch, The fuel rate indicator: A new measuring instrument for display of the characteristics of individual injection, Fuel, Vol. 1966, pp. 04-08, 2013



A new technique for determination of geometry characteristics, mass flow rate and discharge coefficient of a direct gas injection nozzle

I. Erfan¹, M. Ziabasharhagh^{2*}, A. Hajjalimohammadi³, I. Chitsaz⁴

¹K.N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran, ierfan@mail.kntu.ac.ir

²K.N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran, mzia@kntu.ac.ir

³Irankhodro Powertrain Company (IPCO), Tehran, Iran, a_hajjali@aut.ac.ir

⁴Irankhodro Powertrain Company (IPCO), Tehran Iran, i_chitsaz@ip-co.com

*Corresponding Author, Phone Number: +98-9121951875

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 23 November 2013

Accepted: 27 February 2014

Keywords:

Injector

Engine

Direct injection

Image processing

Discharge coefficient

ABSTRACT

In the direct gas injection engine, the mixture formation and the combustion rate are affected by the geometry of injector holes (the diameter, angles, K-factor) and discharge the coefficient of the exit nozzle. This paper presents a new method to determine the diameter and the nozzle exit angle, based on silicone molding of the injector exit nozzle, using image processing techniques. The actual fuel mass flow rate was measured through experiments, which were done with a designed experimental set-up. Tests have been done in an optical constant volume chamber, where the ambient gas was pressurized air, limited between 5 to 15 bar and the injection gas was compressed natural gas (CNG) at two different pressures, 30 and 40 bar. Discharge coefficients have been calculated for different ambient and injection pressures, considering values of actual and ideal mass flow rates. Results verified the present approach for determining the diameter and the nozzle exit angle. Moreover, results showed that there was a direct relationship between the actual mass flow rate and the discharge coefficient with ambient and the injection pressure.