

## مطالعه تجربی فواره خروجی از افشانه نمونه سازی شده تزریق مستقیم گاز

علیرضا حاجی علی محمدی<sup>۱</sup>،<sup>۲</sup> امیر عبدالله<sup>۱\*</sup>، سید مصطفی آقا میرسلیم<sup>۱</sup>، ایمان چیت ساز<sup>۲</sup>،  
مرتضی خلیلی<sup>۱</sup>، مهدی سلطانی<sup>۱</sup>

اطلاعات مقاله	چکیده
<b>واژگان کلیدی:</b> تزریق مستقیم، پردازش تصویر، افشانه، شیلرین، عمق نفوذ، فواره گاز.	در این مقاله از روش نوری شیلرین مبتنی بر عکسبرداری سریع برای اندازه‌گیری ویژگی‌های هندسی فواره تزریق مستقیم گاز استفاده شد. پارامترهای عمق نفوذ محوری و زاویه فواره در نسبت‌های فشار ۲، ۳ و ۴ و قطرهای سوراخ افشانه تک سوراخ نمونه سازی شده ۰/۴، ۰/۵ و ۰/۶ میلی‌متر با استفاده از روش پردازش تصویر نرم افزاری و با تحلیل عکس‌های شیلرین فواره گذرای گاز هلیوم محاسبه شدند. روشی بر مبنای فیلتر گوسی برای لبه‌یابی تصاویر شیلرین ارائه شد. روش استاندارد SAE J2715 برای اندازه‌گیری زاویه فواره مورد استفاده قرار گرفت و از معیار قطر معادل برای بی بعد سازی عمق نفوذ استفاده شد. نتایج تجربی به دست آمده نشان داد که رابطه خطی بین عمق نفوذ بی بعد و زمان بی بعد وجود دارد و شیب این خط بین ۲/۳ تا ۲/۹ تغییر می‌کند. نتایج اندازه‌گیری زاویه نیز نشان داد که زاویه فواره با گذشت زمان از شروع تزریق کاهش می‌یابد و به مقدار ثابتی در انتهای تزریق می‌رسد. همچنین نتایج، ماهیت آماری فواره تزریق مستقیم گاز و ضرورت تکرار آزمون‌ها برای دستیابی به نتایج مطمئن‌تر را اثبات نمود.

### ۱- مقدمه

پاک در این گونه موتورها می‌تواند گام مهمی در کم کردن وابستگی به سوخت‌های فسیلی داشته باشد، سرمایه‌گذاری زیادی روی توسعه این‌گونه موتورها مخصوصاً در کشورهای اروپایی (پروژه NICE) [۱]، کانادا، ژاپن (تزریق مستقیم گاز دیزلی) [۲]، مالزی [۳]، آمریکا [۴] و چین انجام گرفته است. مهم‌ترین موضوعی که در این زمینه حجم وسیعی از تحقیقات را به خود اختصاص داده است، بحث چگونگی شکل‌گیری مخلوط سوخت و هوا در این گونه موتورها است. در موتور تزریق مستقیم گاز اشتعال جرقه‌ای، تزریق گاز طبیعی فشار قوی در مدت زمان کوتاه در چرخه کاری موتور انجام می‌شود و

با توجه به مزیت‌هایی که موتورهای تزریق مستقیم گاز در افزایش بازده تنفسی موتور و کاهش مصرف سوخت و آلاینده‌ها مخصوصاً دی اکسید کربن دارند، پروژه‌های تحقیقاتی زیادی تاکنون در زمینه توسعه این‌گونه موتورها انجام گرفته است و با توجه به این موضوع که استفاده از هیدروژن و گاز طبیعی به عنوان دو سوخت تجدیدپذیر و

\* پست الکترونیک نویسنده مسئول: amirah@aut.ac.ir

۱. دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

۲. مرکز تحقیقات موتور ایران خودرو (ایپکو)

تزریق مستقیم گاز در موتور شفاف تکاستوانه‌ای به قطر استوانه<sup>۵</sup> ۱۷۰ و طول مسیر<sup>۶</sup> ۱۹۰ میلی‌متر توسط روباس و همکاران (۱۹۹۸) برای حالت سمبه ثابت و سمبه متحرک (حالت موتور گردانی<sup>۷</sup>) انجام گرفت [۶]. گاز متان توسط افشانه ۱۰ سوراخ (۹ سوراخ استوانه‌ای با موقعیت قرارگیری دایره‌ای به قطر ۰/۹ میلی‌متر و یک سوراخ مرکزی به قطر ۱/۱ میلی‌متر) با فشار تزریق ۱۸۰ اتمسفر، داخل محفظه احتراق موتور که فشار آن بین ۱/۳۸ تا ۲۰/۶۸ متغیر بود، پاشیده شد. روش نوری مورد استفاده، روش PLIF بود. این تحقیق نشان داد که با افزایش نسبت فشار در اثر کاهش چگالی گاز درون مخزن، عمق نفوذ شعاعی فواره کاهش و سرعت لبه آن افزایش می‌یابد. اولتی و هیل در سال ۱۹۹۲ مدل‌سازی ویژگی‌های فواره سوخت گاز پرفشار در موتور گازسوز دیزل را مورد مطالعه قرار دادند. آنها پاشش سوخت را در یک محفظه حجم ثابت انجام دادند و توانستند با این آزمایش یک الگوی تحلیلی- تجربی برای عمق نفوذ متان در شرایط مختلف به دست آورند که البته این مدل در لحظات اولیه پاشش قابل استفاده نبود. در این مدل، عمق نفوذ با جذر زمان، سرعت اولیه، نسبت فشار تزریق و جذر چهارم نسبت چگالی متان به هوا در ارتباط است [۷ و ۸]. در سال ۲۰۰۶، بنیامین پترسن تحقیق خود را در مورد اندازه گیری فواره سوخت پرفشار هیدروژن در حالت گذرا انجام داد [۹]. وی در این تحقیق از افشانه‌های ۳، ۷، ۹ و ۱۳ سوراخه استفاده کرد و پاشش را درون یک محفظه حجم ثابت انجام داد. در انتها وی به این نتیجه رسید که عمق نفوذ با افزایش فشار پاشش افزایش و با افزایش چگالی هوای محفظه کاهش می‌یابد. همچنین در این تحقیق زاویه فواره نیز اندازه‌گیری شد. اما به دلیل تغییرپذیری و رفتار غیر منظم فواره، محقق به جواب قابل اعتماد کمی در مورد زاویه فواره رسید. روش شیلرین به همراه پردازش

مانند موتور تزریق مستقیم بنزینی، احتراق لایه‌ای<sup>۱</sup> در بارهای جزئی و احتراق مخلوط همگن<sup>۲</sup> در تمام بار وجود خواهد داشت. از آنجا که در موتورهای تزریق مستقیم گاز، سوخت مستقیماً داخل محفظه احتراق تزریق می‌شود، مخلوط سوخت و هوای تشکیل شده در محفظه احتراق، پیش از زمان جرقه باید توزیع مناسبی داشته باشد تا احتراق کاملی صورت پذیرد و در نتیجه آن، آلاینده‌های مونواکسید کربن و هیدروکربن نسوخته کمتری تولید شود [۵]. این مسئله بخصوص در عملکرد موتور در حالت احتراق لایه‌ای اهمیت ویژه‌ای دارد. از آنجا که در موتورهای تزریق مستقیم هدایت فواره که جدیدترین نسل موتورهای تزریق مستقیم محسوب می‌شوند، افشانه مهمترین نقش را در شکل‌گیری مخلوط ایفا می‌کند. شناخت دقیق و عمیق خصوصیات فواره تزریق شده داخل محفظه احتراق موتورهای تزریق مستقیم گاز، می‌تواند اهمیت قابل توجهی در توسعه روش‌های طراحی و ساخت این‌گونه موتورها داشته باشد.

با توجه به پیشرفت روزافزون رایانه‌ها، منابع نور و دوربین‌های پرسرعت، استفاده از روش‌های نوری برای مطالعه پدیده‌های تزریق سوخت و احتراق در موتورهای احتراق داخلی در دو دهه اخیر توسعه زیادی یافته است.

پدیده تزریق سوخت در موتور تزریق مستقیم گاز در مدت زمان بسیار کوتاهی از مرتبه چند میلی ثانیه اتفاق می‌افتد. بنابراین برای عکسبرداری از فواره گاز نیاز به دوربینی است که سرعت عکسبرداری بسیار تندی داشته باشد. از طرفی، با توجه به بی‌رنگ بودن فواره گاز، نمی‌توان از روش عکسبرداری مستقیم برای آشکارسازی آن استفاده نمود. تاکنون روش‌های شیلرین، سرعت سنجی به کمک ذرات نشانگر<sup>۳</sup> و بازتابش فلورسنت لیزر<sup>۴</sup> برای تعیین خصوصیات فواره تزریق مستقیم گاز مورد استفاده قرار گرفته‌اند. مطالعه تحلیلی و آزمون فواره

<sup>5</sup> Bore

<sup>6</sup> Stroke

<sup>7</sup> Motoring

<sup>1</sup> Stratified Combustion

<sup>2</sup> Homogeneous Combustion

<sup>3</sup> PIV (Particle Image Velocimetry)

<sup>4</sup> LIF (Laser Induced Florescence)

با توجه به اینکه در تحقیقات قبلی اثر قطر سوراخ خروجی افشانه و نسبت فشارهای مختلف روی خصوصیات فواره تزریق مستقیم گاز در یک تحقیق مورد مطالعه قرار نگرفته بود و تعریف مشخصی برای اندازه‌گیری زاویه فواره تزریق مستقیم گاز در مقالات موجود نبود، در این مقاله، مطالعه تجربی اثر پارامترهای نسبت فشار و قطر سوراخ خروجی افشانه روی عمق نفوذ محوری و زاویه فواره تزریق مستقیم گذرای گاز انجام گرفت. از روش عکسبرداری شیلرین سریع برای محاسبه خصوصیات فواره تزریق مستقیم گاز استفاده شد. از استاندارد J2715 SAE [۱۴] برای تعیین زاویه فواره استفاده شد. بی بعد سازی عمق نفوذ بر حسب زمان برای حالت‌های مختلف آزمون نیز از دیگر نتایج کار هستند.

## ۲- آزمون های تجربی

### ۲-۱- طراحی آزمون ها

در این تحقیق، با توجه به این که برای مطالعه تجربی فواره خروجی از افشانه تزریق مستقیم گاز نیاز به آشکار سازی جریان و تحلیل تصاویر به دست آمده از جریان آشکار شده وجود داشت، از روش شیلرین استفاده شد. این روش برای مشاهده و اندازه‌گیری خصوصیات سیالات تراکم‌پذیر، انتقال حرارت جابجایی، اختلاط و انتقال جرم، احتراق و جریان‌های باچگالی طبقه‌ای (لایه لایه) به کار می‌رود. اساس عملکرد روش شیلرین بر مبنای تغییر ضریب شکست پرتوهای موازی نور عبوری از منطقه آزمون (در اینجا محل فواره) در اثر تغییر چگالی گاز در نقاط مختلف پایدار است. رابطه بین چگالی گاز و ضریب شکست نور عبوری از آن به صورت زیر بیان می‌شود [۱۵]:

$$n - 1 = k\rho \quad (1)$$

در این رابطه  $n$  ضریب شکست نور،  $k$  ثابت گلدستون دیل و  $\rho$  چگالی گاز است. در آزمون‌ها از گاز هلیوم استفاده شد. به دلیل اختلاف ضریب شکست نور گاز

تصویر نرم‌افزاری<sup>۱</sup> برای اندازه‌گیری عمق نفوذ و زاویه، فواره تزریق مستقیم گاز CNG خروجی از شمع افشانه<sup>۲</sup>، توسط چان و همکاران (۲۰۰۷) مورد استفاده قرار گرفت [۱۰]. تزریق مستقیم نیتروژن داخل محفظه حجم ثابت حاوی نیتروژن با فشارهای تزریق ۵۰، ۶۰ و ۸۰ اتمسفر و فشار محفظه حجم ثابت ۱ اتمسفر و اندازه‌گیری عمق نفوذ و زاویه فواره گاز توسط روش PLIF توسط طیب اسکندر و همکاران (۲۰۰۹) انجام شد [۱۱]. مطالعه خصوصیات هندسی و میدان سرعت فواره تزریق مستقیم گاز توسط بائرت و همکاران (۲۰۱۰) انجام شد. آنها به دلایل ایمنی از نیتروژن (به عنوان گاز تزریق و گاز درون محفظه حجم ثابت اپتیکی) استفاده نمودند [۱۲]. روش‌های لیزری PIV<sup>۳</sup> برای اندازه‌گیری میدان سرعت داخل فواره و PLMS<sup>۴</sup> برای اندازه‌گیری ویژگی‌های فواره (عمق نفوذ و زاویه) توسط آنها به کار گرفته شد. نتایجی که از این روش‌ها به دست آوردند نشان داد که عمق نفوذ محوری فواره با جذر زمان رابطه خطی دارد. اندازه‌گیری‌های آنها همچنین نشان داد که فاصله مرکز گردابه جلوی فواره تا دماغه<sup>۵</sup>، برابر ۷۵ درصد عمق نفوذ است و زاویه فواره گذرا با گذشت زمان پس از شروع تزریق افزایش می‌یابد. یو و همکاران (۲۰۱۲) با استفاده از روش PLIF، نتایج کمی مربوط به میدان نسبت جرمی گاز تزریق شده به کل مخلوط را برای فواره تزریق مستقیم گاز ارائه نمودند. آنها به دلایل ایمنی، از تزریق مستقیم گاز نیتروژن به جای متان استفاده نمودند [۱۳]. قطرهای نازل مورد استفاده ۰/۵ و ۱/۴ میلی‌متر و فشارهای تزریق در محدوده ۴۰-۵ اتمسفر و فشارهای محفظه نیتروژن که تزریق داخل آن انجام گرفت، ۱ و ۵ اتمسفر بود. آنها روشی برای تخمین افت فشار تزریق پس از شروع تزریق ارائه نمودند.

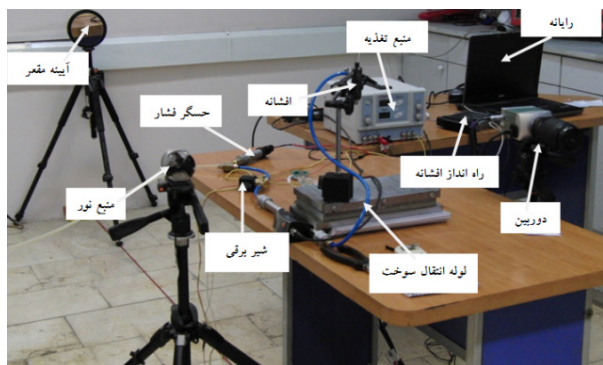
<sup>1</sup> Digital Image Processing

<sup>2</sup> Spark Plug Fuel Injector

<sup>3</sup> Particle Image Velocimetry

<sup>4</sup> Planar Laser Mie Scattering

<sup>5</sup> Nozzle



شکل ۲- تصویر مربوط به چیدمان آزمون شیلرین و قسمت‌های مختلف آن

چکیده شرایط آزمون‌ها در جدول ۱ آورده شده است.

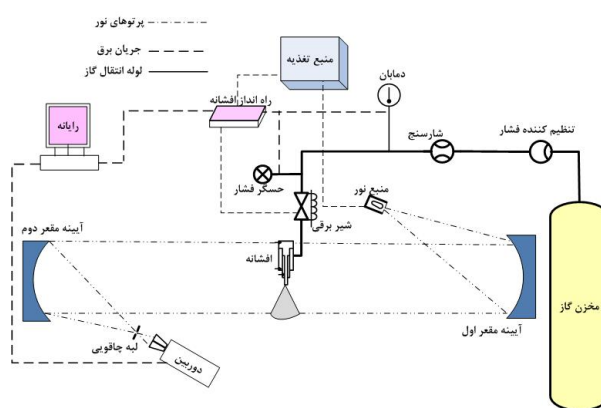
جدول ۱- چکیده شرایط آزمون‌ها

مقدار (واحد)	کمیت
هلیوم	گاز تزریق
۲۹۳ (درجه کلوین)	دمای گاز تزریق
۰٫۲ و ۳ و ۴	نسبت فشار
۰٫۸۷۲۱ (اتمسفر)	فشار محیط
۰٫۱۶ و ۰٫۱۵ و ۰٫۱۴ (میلی‌متر)	قطر سوراخ نازل
۰٫۸ (میلی‌متر)	طول سوراخ نازل
۶ (میلی ثانیه)	مدت زمان تزریق
۰٫۲ (میلی ثانیه)	فاصله بین دو عکس شیلرین متوالی

## ۲-۲- تجهیزات مورد استفاده در آزمون‌ها

در آزمون‌ها دو آینه سهمی وار<sup>۱</sup> مقعر با فاصله کانونی ۲۵۷۰ و ۲۶۱۰ میلی‌متر مورد استفاده قرار گرفتند. قطر هر دو آینه برابر با ۱۵ سانتی‌متر بود. ساخت و اندازه‌گیری دقیق فاصله کانونی این آینه‌ها توسط شرکت دیده‌بانی مناظر صورت گرفت. آینه‌ها روی پایه‌های دوربین‌های فیلم‌برداری، همانطور که در شکل ۲ نشان داده شده است، نصب شده و توسط ترازهای نصب شده روی پایه‌ها، تراز شدند. منبع نور مورد استفاده نیز لامپ هالوژن بود، که داخل یک محفظه آلومینیومی که دارای یک سوراخ ریز با قطر ۲ میلی‌متر برای خروج نور است، قرار گرفت تا توسط سوراخ خروجی ریز محفظه، نور نقطه‌ای واگرا شونده ایجاد شود.

هلیوم و هوا، در تصاویر شیلرین تزریق گاز هلیوم در هوا، گاز هلیوم به خوبی قابل تشخیص است [۱۵]. دلایل دیگر استفاده از گاز هلیوم، نزدیک بودن چگالی آن به گاز متان و هیدروژن و ایمنی آن به دلیل بی‌اثر بودنش بود. از آنجا که عامل مهم در تزریق مستقیم گاز نسبت چگالی (نسبت فشار در موتور احتراق داخلی) است، آزمون‌ها در هوای محیط با نسبت فشارهای مختلف انجام شد. همانطور که در شکل ۱ نشان داده شده است، در آزمون‌ها از چیدمان Z شکل شیلرین استفاده شد.

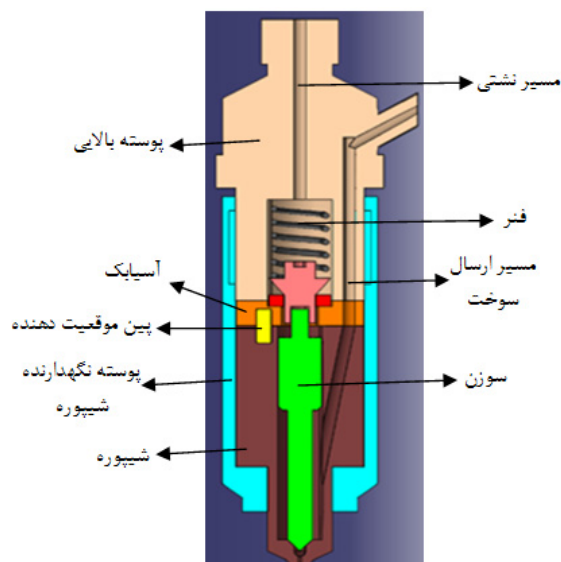


شکل ۱- تصویر شماتیک قسمت‌های مختلف چیدمان آزمون شیلرین

همانطور که در شکل ۱ نشان داده شده است، ابتدا پرتوهای نورانی منبع نور نقطه‌ای که در محل کانون آینه مقعر اول قرار دارد پس از برخورد به آن، موازی شده و از محل مورد نظر تصویربرداری عبور می‌کنند. سپس برخورد پرتوهای موازی با آینه مقعر دوم باعث جمع شدن پرتوها در محل کانون آن شده و پرتوهای اضافی با استفاده از لبه چاقویی فیلتر می‌شوند و پس از عبور از عدسی متصل به دوربین نقش بسته و تصویر را ایجاد می‌کنند. آزمون‌ها در آزمایشگاه اپتیک مرکز تحقیقات موتور ایران خودرو انجام گرفت. قسمت‌های مختلف آزمون شیلرین در شکل ۲ نشان داده شده است.

<sup>۱</sup> - parabolic

به افشانه‌ای که قابلیت تزریق سوخت پرفشار را داشته باشد و بتواند برای آزمون‌های مطالعه فواره در این کار و کارهای تحقیقاتی بعدی مورد استفاده قرار گیرد، افشانه‌ای طراحی و ساخته شد. ساختمان و نحوه عملکرد این افشانه بر اساس الگوبرداری از افشانه‌های موجود طراحی شد و ابعاد آن نیز با توجه به محاسبات یک بعدی دینامیک گاز و نیازمندی‌های رواداشتی<sup>۶</sup> به دست آمد [۱۷ و ۱۸]. این افشانه یک نوع افشانه مکانیکی- برقی است. در واقع کنترل تزریق با استفاده از یک شیر برقی که در خارج افشانه قرار دارد صورت می‌گیرد. تحریک سوزن افشانه به وسیله فشار گاز انجام می‌گیرد. ساخت افشانه توسط شرکت آریا دیزل پارت انجام شد. در شکل ۳ قسمت‌های مختلف این افشانه و در شکل ۴ افشانه ساخته شده نشان داده شده‌اند. برای مطالعه اثر قطر سوراخ خروجی افشانه روی شکل‌گیری آن برای این افشانه، ۳ دماغه با قطرهای سوراخ خروجی ۰/۴، ۰/۵ و ۰/۶ میلی‌متر طراحی و ساخته شد.



شکل ۳- قسمت‌های مختلف تشکیل دهنده افشانه طراحی و ساخته شده

برای عکسبرداری از دوربین پرسرعت Cube 3 استفاده شد. این دوربین ساخت شرکت Motion Blitz آلمان می‌باشد. سرعت عکسبرداری آن بیشینه قدرت تفکیک<sup>۱</sup>  $512 \times 512$  نقطه، ۲۵۰۰ عکس بر ثانیه<sup>۲</sup> می‌باشد و با افزایش سرعت عکسبرداری قدرت تفکیک عکس‌ها کاهش می‌یابد. برای انجام این آزمون‌ها از سرعت عکسبرداری  $512 \times 318$  نقطه<sup>۳</sup> استفاده شد. عکس‌های گرفته شده با پسوند Bitmap در حافظه رایانه ذخیره شده و دارای محدوده دینامیکی<sup>۴</sup> ۸ بیت بودند. همانطور که در شکل ۲ نشان داده شده است یک عدسی ۳۰۰-۸۰ میلی‌متری به دوربین متصل شد تا بزرگنمایی لازم ایجاد شود. ضریب مقیاس آزمون ۰/۵ میلی‌متر بر پیکسل و محدوده عکسبرداری  $256 \times 159$  میلی‌متر در پایین دست نازل بود.

حسگر فشار استفاده شده در این آزمون‌ها ساخت شرکت Jumo مدل drans p30 بود که توسط کالیبراتور فشار DPI 610 شرکت Druck واسنجی شد. محدوده اندازه‌گیری این حسگر ۰-۶ اتمسفر می‌باشد. تکرارپذیری اندازه‌گیری فشار برای این حسگر برابر  $\pm 0.3\%$  اتمسفر می‌باشد [۱۶]. این حسگر توسط راه‌انداز افشانه که در واقع یک واحد پایش الکترونیکی موتور<sup>۵</sup> می‌باشد پایش می‌شود. راه اندازه‌گیری شیر برقی متصل به افشانه و اندازه‌گیری فشار بر حسب زمان توسط نرم‌افزاری که اطلاعات مورد نیاز توسط آن از مجموعه پایشگر استخراج می‌شود، انجام شد.

### ۲-۳ طراحی و ساخت افشانه تزریق مستقیم گاز

در حال حاضر افشانه تزریق مستقیم گاز تجاری تک سوراخه در بازار موجود نمی‌باشد. بنابراین با توجه به نیاز

<sup>1</sup> Resolution

<sup>2</sup> Frames Per Second

<sup>3</sup> Pixel

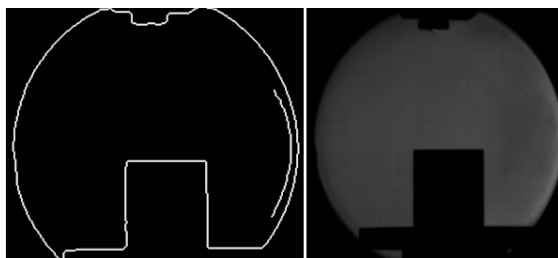
<sup>4</sup> Dynamic Range

<sup>5</sup> ECU (Engine Control Unit)

<sup>6</sup> Tolerance

مقدار برابر صفر می‌باشد. سطر و ستون‌های جدول نمایانگر جایگاه نقاط در تصاویر خواهند بود.

برای اندازه‌گیری فاصله نقاط از یک قطعه اندازه استاندارد<sup>۳</sup> به طول ۴۰ میلی‌متر استفاده شد. ابتدا از این قطعه عکسبرداری صورت گرفت و با برابر قرار دادن این طول با تعداد نقاط درون تصویر دودویی توسط برنامه نوشته شده، طول و عرض هر یک از نقطه‌های تصویر بدست آمد که این طول برای محاسبه عمق نفوذ و زاویه فواره ضروری است. برای تبدیل تصاویر خاکستری به دودویی از روش لبه‌یابی<sup>۴</sup> Canny استفاده شد [۱۹]. روش کار این روش 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 تبدیل می‌شود. به این ترتیب که نقاطی که مقدار به دست آمده از اعمال مشتق تابع گوسی از حد آستانه اختصاص داده شده بیشتر است، برابر ۱ (سفید) و بقیه نقاط برابر صفر (سیاه) در نظر گرفته می‌شوند. برای اندازه‌گیری ضریب مقیاس عکس‌ها از یک قطعه اندازه استاندارد به طول ۴۰ میلی‌متر استفاده شد. ابتدا از این قطعه عکسبرداری صورت گرفت و با برابر قرار دادن این طول با تعداد نقاط درون تصویر دودویی توسط برنامه نوشته شده، ضریب مقیاس عکس‌ها به دست آمد. در شکل ۵ فرایند کار نشان داده شده است.



شکل ۵- تصویر سمت راست: تصویر خاکستری از قطعه اندازه و تصویر سمت چپ: تصویر دودویی از قطعه اندازه

در مرحله بعد، همان طور که اشاره شد، با تبدیل تصاویر خاکستری به تصاویر دودویی و شمارش تعداد نقاط از



شکل ۴- افشانه طراحی و ساخته شده

### ۳- تحلیل تصاویر

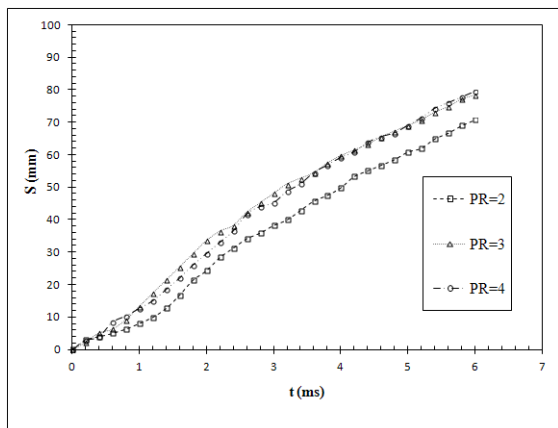
برای تحلیل تصاویر باید تصاویر ابعاد نقاط در راستای افقی و عمودی به دست آیند. تصاویر به دست آمده از عکسبرداری دارای  $254 \times 512$  نقطه هستند که پس از برش تصاویر توسط نرم افزار به  $230 \times 250$  نقطه کاهش پیدا می‌کند. برای پردازش تصویر در ابتدا تصاویر به صورتی تغییر پیدا می‌کنند که کار با آن راحت‌تر شود. هر نقطه از یک عکس خاکستری به صورت مجموعه‌ای از صفرها و یک‌ها برای کامپیوتر تعریف می‌شوند که در یک بایت<sup>۱</sup> نگه داشته می‌شوند. هر بایت از ۸ سلول تشکیل شده که می‌تواند یکی از ۲ مقدار صفر و یک را در خود داشته باشد، که در کل، ۲۵۶ حالت مختلف برای هر نقطه امکانپذیر است که عدد صفر مشخص کننده رنگ سیاه و عدد ۲۵۵ بیانگر رنگ سفید می‌باشد. در این آزمایش‌ها، عکس‌های خاکستری به تصاویر دودویی<sup>۲</sup> تبدیل می‌شوند که در آن هر نقطه فقط می‌تواند یکی از دو عدد صفر یا یک را داشته باشد و در نتیجه کار کردن با تصاویر جدید راحت‌تر و زمان تحلیل آنها هم کمتر خواهد بود. پس هر نقطه از تصویر یک عضو از جدول می‌باشد که در صورت سفید بودن مقدار آن برابر عدد ۱ و در صورت سیاه بودن

<sup>۳</sup> - Block gauge

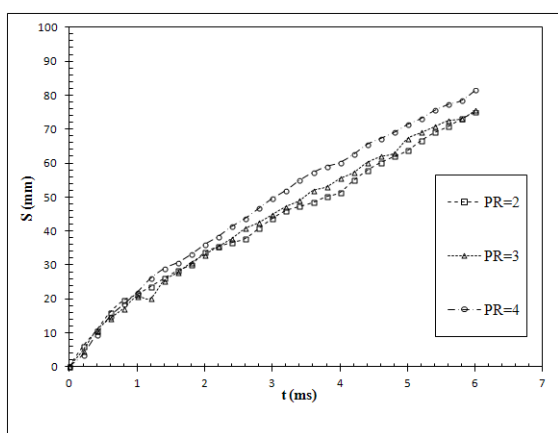
<sup>۴</sup> -Algorithm

<sup>۱</sup> -Byte

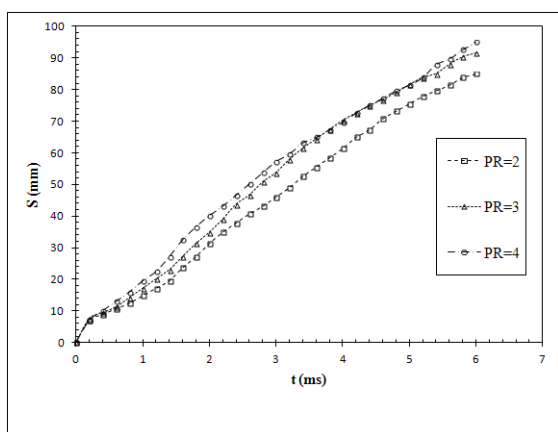
<sup>۲</sup> -Binary



شکل ۷- عمق نفوذ بر حسب زمان برای قطر سوراخ خروجی دماغه ۰/۴ میلی متر و نسبت‌های فشار ۲، ۳ و ۴



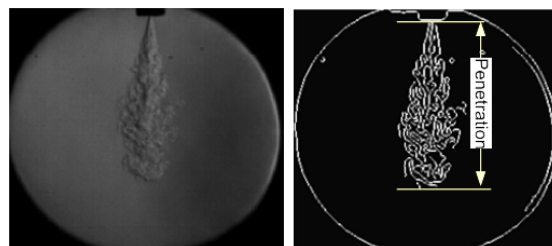
شکل ۸- عمق نفوذ بر حسب زمان برای قطر سوراخ خروجی دماغه ۰/۵ میلی متر و نسبت‌های فشار ۲، ۳ و ۴



شکل ۹- عمق نفوذ بر حسب زمان برای قطر سوراخ خروجی دماغه ۰/۶ میلی متر و نسبت‌های فشار ۲، ۳ و ۴

جهت ارائه رابطه کلی برای فواره تزریق مستقیم گاز که نه تنها برای فواره هلیوم، بلکه برای فواره‌های سوخت نظیر هیدروژن و متان هم بتواند مورد استفاده قرار گیرد،

ابتدای افشانه تا سر فواره، عمق نفوذ برای هر تصویر به- دست آمد. برای محاسبات عمق نفوذ و زاویه، کدی در نرم‌افزار MATLAB برای این کار توسعه داده شد. نمونه‌ای از عکس شیلرین و تصویر دودویی شده آن در شکل ۶ نشان داده شده است. لبه فواره نقطه‌ای تعریف شد که در پیشانی فواره بیشترین فاصله را از نوک دماغه دارد.

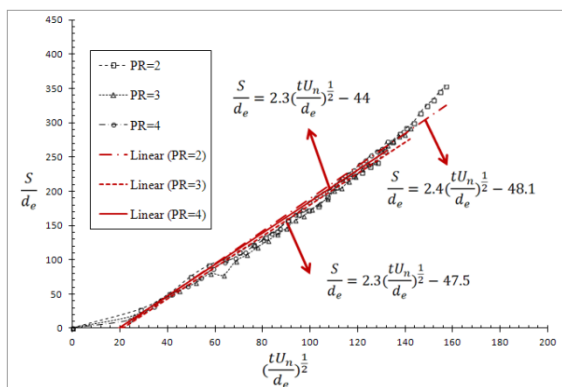


شکل ۶- تصویر سمت چپ: تصویر خاکستری از فواره سوخت، تصویر سمت راست: تصویر به دست آمده از پردازش تصویر به روش Canny

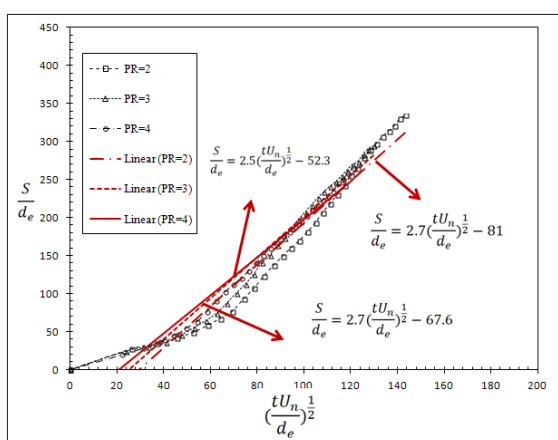
#### ۴- نتایج

##### ۴-۱- عمق نفوذ

همانطور که در قسمت قبل گفته شد، تصاویر پس از انتقال به رایانه با توجه به نرم‌افزار ایجاد شده، تحلیل شدند تا عمق نفوذ فواره در زمان‌های مختلف محاسبه شود. لحظه‌ای که اولین بخش گاز از فواره خارج می‌شود به عنوان شروع تزریق در نظر گرفته می‌شود و نرم‌افزار نوشته شده این قابلیت را دارد که این زمان را شناسایی کرده و برای حالت‌های مختلف آن را در نظر بگیرد. در شکل‌های ۷ تا ۹ نتایج محاسبه شده عمق نفوذ برای نسبت‌های فشار مختلف و قطرهای مختلف سوراخ دماغه نشان داده شده‌اند. همانطور که گفته شد، زمان محاسبه خصوصیات فواره از صفر تا ۶ میلی‌ثانیه و در فواصل زمانی ۰/۲ میلی‌ثانیه می‌باشد.



شکل ۱۱- عمق نفوذ بی بعد بر حسب زمان بی بعد برای قطر سوراخ خروجی دماغه ۰/۵ میلی متر و نسبت های فشار ۲، ۳ و ۴



شکل ۱۲- عمق نفوذ بی بعد بر حسب زمان بی بعد برای قطر سوراخ خروجی دماغه ۰/۶ میلی متر و نسبت های فشار ۲، ۳ و ۴

همانطور که در شکل های ۱۲-۱۰ نشان داده شده است، بر اساس نتایج تجربی فواره تزریق مستقیم گاز، عمق نفوذ بی بعد با جذر زمان بی بعد رابطه خطی دارد و شیب این خط بین ۲/۳ تا ۲/۹ تغییر می کند. در ابتدای تزریق، شیب خط با شیب خط پس از ۲ میلی ثانیه بعد از شروع تزریق تفاوت دارد و شیب کمتری دارد. با توجه به سازوکار عملکرد افشانه در ابتدای تزریق، زمانی طول می کشد تا سوزن افشانه به طور کامل بلند شود و چون افشانه ای که در اینجا مورد استفاده قرار گرفت یک افشانه مکانیکی است، این زمان به نسبت زمان بلندشدگی سوزن در افشانه های برقی بزرگتر است. بنابراین در طول زمان بلندشدگی که سوراخ دماغه به طور کامل باز نیست و سطح مقطع مؤثر آن به تدریج افزایش می یابد، رفتار فواره

می توان از مقیاس زمان و عمق نفوذ بی بعد نشان داده شده در شکل های ۱۲-۱۰ استفاده نمود. برای فواره های تراکم پذیر، پارامتر قطر مؤثر ( $d_{eq}$ ) معمولاً برای بی بعد سازی مورد استفاده قرار می گیرد و برای فواره های در حال انبساط<sup>۱</sup> به صورت زیر تعریف می شود:

$$d_{eq} = d_n \left( \frac{\rho_n}{\rho_a} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (۲)$$

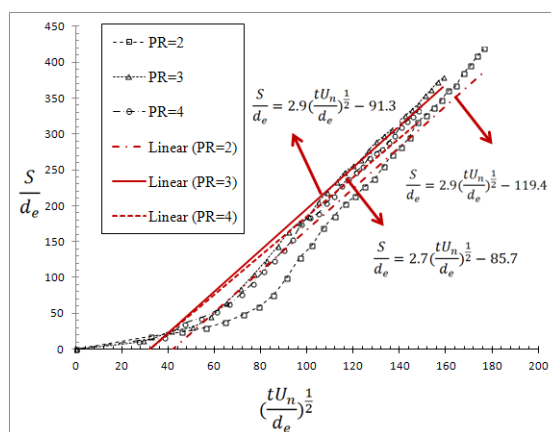
که در آن  $d_n$  قطر سوراخ خروجی دماغه،  $\rho_n$  چگالی گاز تزریق در محل دماغه و  $\rho_a$  چگالی گاز درون مخزن است.  $\rho_n$  برای فواره از تئوری فواره پایای گاز به صورت زیر محاسبه می شود:

$$\rho_n = \frac{P_0}{RT_0} \left( \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{1}{k-1}} \quad (۳)$$

با توجه به معیار قطر معادل  $d_{eq}$ ، زمان بی بعد به صورت  $\left( \frac{tU_n}{d_e} \right)^{\frac{1}{2}}$  و عمق نفوذ بی بعد به صورت  $\frac{S}{d_e}$  تعریف شدند که  $U_n$  سرعت گاز خروجی از دماغه است که به صورت زیر محاسبه می شود:

$$U_n = \sqrt{\frac{2k}{k+1} RT_0} \quad (۴)$$

K در این رابطه نسبت گرمای ویژه گاز است.

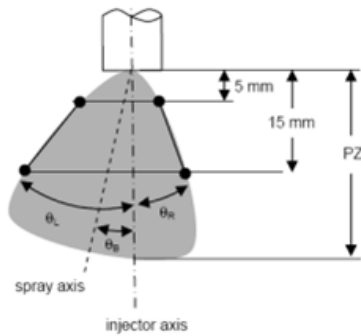


شکل ۱۰- عمق نفوذ بی بعد بر حسب زمان بی بعد برای قطر سوراخ خروجی دماغه ۰/۴ میلی متر و نسبت های فشار ۲، ۳ و ۴

<sup>1</sup> Under-Expanded



توجه به تعریف ارائه شده، نتایج اندازه‌گیری زاویه برای حالت‌های مختلف آزمون در شکل ۱۴ نشان داده شده‌اند.

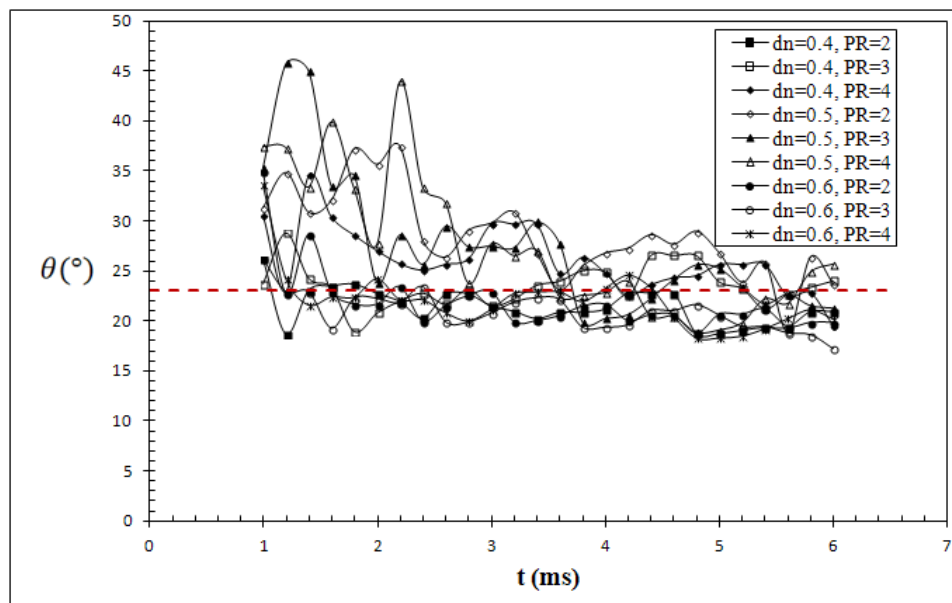


شکل ۱۳- تعریف زاویه فواره سوخت بر اساس استاندارد J2715 SAE

با رفتار آن در زمانی که سوراخ دماغه به طور کامل باز است، متفاوت است.

#### ۲-۴- نتایج اندازه‌گیری زاویه

برای به‌دست آوردن زاویه نیز از استاندارد J2715 SAE استفاده شد [۱۴]. این استاندارد بیان می‌کند که برای اندازه‌گیری زاویه باید کناری‌ترین نقاط فواره را در ۵ و ۱۵ میلی‌متری شروع فواره به‌دست آورد و با اتصال این نقاط به یکدیگر و استفاده از تابع تانژانت معکوس زاویه فواره را به‌دست آورد. همانطور که در شکل ۱۳ نشان داده شده است، با اندازه‌گیری زوایای چپ ( $\theta_L$ ) و راست ( $\theta_R$ ) و مجموع این دو زاویه، زاویه کلی فواره به دست آمد. با



شکل ۱۴- زاویه فواره گذرا بر حسب زمان برای حالت‌های مختلف آزمون

در مورد اثر نسبت فشار و قطر سوراخ خروجی روی زاویه باید گفت که روند مشخصی مشاهده نمی‌شود. البته باید به یک مسئله توجه نمود که در این جا نسبت‌های فشار و قطر سوراخ افشانه در حالت‌های مختلف به هم خیلی نزدیک هستند و همین موضوع می‌تواند تصمیم‌گیری را مشکل کند. از طرفی، به دلیلی که گفته شد چون ممکن است محدوده خطاهای آزمون برای حالت‌های مختلف که ناشی از خطای روش پردازش تصویر، خطای اندازه‌گیری

همانطور که در شکل ۱۴ نشان داده شده است، زاویه فواره گذرای گاز در ابتدا بزرگ است و با گذشت زمان پس از شروع تزریق کاهش پیدا کرده، به سمت عدد ثابتی میل می‌کند. این پدیده در تمامی نسبت‌های فشار مشاهده می‌شود. بزرگ بودن زاویه فواره در ابتدای تزریق فواره اثبات می‌کند که فواره در ابتدای شکل‌گیری بیشتر تمایل دارد به سمت شعاعی نفوذ کند.

سوختهای متان و هیدروژن قابل استفاده باشد. نتایج بی‌بعد شده نشان می‌دهند که عمق نفوذ بی‌بعد رابطه خطی با زمان بی‌بعد دارد و شیب این خط بین  $2/3$  تا  $2/9$  تغییر می‌کند.

- نتایج عمق نفوذ و زاویه فواره در ابتدای شکل‌گیری آن (برای زمان ۲ میلی‌ثانیه پس از شروع تزریق) با نتایج بعد از آن متفاوت است و این به دلیل پدیده‌هایی است که در ابتدای شکل‌گیری فواره وجود دارند.

- به دلیل مغشوش بودن جریان فواره سوخت، ممکن است در جایی ذرات سیال فواره سوخت حرکت عرضی بیشتری نسبت به حرکت میانگین خود در چندبار تکرار فرایند داشته باشند و نرم‌افزار این ذرات را به عنوان لبه فواره تشخیص دهد و در نتیجه، نتایج اندازه‌گیری نسبت به حالت واقعی انحراف داشته باشند. این خطا فقط به خاطر مغشوش بودن جریان است. بهترین راه برای کم‌کردن این خطا، انجام آزمایش به دفعات متعدد و میانگین‌گیری از نتایج می‌باشد تا عدم قطعیت نتایج بسیار کم شود.

#### قدردانی و تشکر

نویسندگان مقاله مراتب قدردانی خود را از مرکز تحقیقات موتور ایران خودرو به خاطر حمایت مالی این کار تحقیقاتی اعلام می‌دارند. همچنین از کارشناسان شرکت آریا پارت دیزل به خاطر همکاری در ساخت قطعات تشکر می‌نمایند.

فشار، رفتار غیرخطی سوزن افشانه و ماهیت گردبادی جریان فواره است باعث شوند نتوان روند مشخصی را تشخیص داد. از طرفی، به دلیل ماهیت آشفته جریان فواره این ویژگی‌های ذکر شده از قبیل زاویه و عمق نفوذ ماهیت آماری دارند. در مورد شکل ۱۳ باید اضافه نمود که زاویه‌ها از زمان ۱ میلی‌ثانیه به بعد تعریف شده‌اند که دلیل آن این است که حداقل زمانی که لازم است که فواره تا ۱۵ میلی‌متر نفوذ کند تا طبق تعریف استاندارد J2715 SAE بتوان زاویه آن را اندازه گرفت، ۱ میلی‌ثانیه است. همانطور که در شکل ۱۳ مشخص شده است می‌توان گفت که زاویه فواره برای محدوده نسبت فشار بین ۲-۴ بیشتر بین ۱۸ تا ۳۰ درجه تغییر می‌کند و می‌توان میانگین ۲۳ درجه را برای آن ذکر نمود.

#### ۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله، روشی برای اندازه‌گیری تجربی خصوصیات ماکروسکوپی فواره تزریق مستقیم گاز با استفاده از روش شیلرین پیشنهاد شد و نرم‌افزاری بر مبنای پردازش تصویر نرم‌افزاری برای استخراج داده‌های کمی از عکس‌های شیلرین توسعه داده شد. نتایج به دست آمده از این تحقیق را می‌توان به صورت زیر خلاصه نمود:

- عمق نفوذ محوری فواره تزریق مستقیم گاز با افزایش نسبت فشار و افزایش قطر سوراخ خروجی دماغه افزایش می‌یابد.

- با استفاده از قطر معادل می‌توان زمان و عمق نفوذ را بی‌بعد نمود تا نتایج برای گازهای مختلف از جمله

#### مراجع

- [1] Baratta, M., Catania, A.E., Spessa, E., Herrmann, L., Roessler, K. (2008), "Multi- dimensional modeling of direct natural-gas injection and mixture formation in a stratified-charge SI engine with centrally mounted injector", SAE Paper No. 2008-01-0975.

- [2] Hiroyuki, S., Tetsuya, W., Yasuhiro, T. (2005), "Development of CNG direct injection diesel cycle engine". Isuzu Technical J., Vol. 114, pp. 47-53.
- [3] Kalam, M.A., Masjuki, H.H., Mahlia, T.M.I., Fuad, M.A., Halim, K., Ishak, A., Khair, M., Yusoff, A., Shahrir, A. (2009), "Experimental test of a new compressed natural gas engine with direct injection". SAE Paper No. 2009-01-1967.
- [4] Cox, G.B., Del Vecchio, K.A., Hays, W.J., Hiltner, J.D., Nagaraj, R., Emmer, C. (2000), "Development of a direct-injected natural gas engine system for heavy-duty vehicles". Technical Report, Caterpillar, Inc.
- [5] Zhao, F., Harrington, D.L., La, M. (2002), "Automotive spark-ignited direct-injection gasoline engines". Warrendale: Society of Automobile Engineers, Inc., USA.
- [6] Rubas, P.J., Paul, M.A., Martin, G.C., Coverdill, R.E., Lucht, R.P., Peters, J.E., Del Vecchio, K.A. (1998), "Methane jet penetration in a direct injection natural gas engine". SAE Paper No. 980143.
- [7] Hill, P.G., Ouellette, P. (1999), "Transient turbulent gaseous fuel jets for diesel engines". J. Fluids Eng., Vol. 121, No. 1, pp. 93-101.
- [8] Ouellette, P., Hill, P.G. (2000), "Turbulent transient gas injections". J. Fluids Eng., Vol. 122, pp. 743-753.
- [9] Petersen, B. (2006), "Transient high-pressure hydrogen jet measurements". MSc. Thesis, University of Wisconsin, Madison, USA.
- [10] Chan, E.C., Evans, R.L., Davy, M.H., Cordiner, S. (2007), "Pre-ignition characterization of partially-stratified natural gas injection". SAE Paper No. 20077252.
- [11] Mohamad, T.I., Harrison, M., Jermy, M., How, H.G. (2009), "The structure of the high-pressure gas jet from a spark plug fuel injector for direct fuel injection". J. Visual., Vol. 13, No. 2, pp. 121-131.
- [12] Baert, R., Klaassen, A. (2010), "Direct injection of high pressure gas: Scaling properties of pulsed turbulent jets". SAE Paper No. 2010-01-2253.
- [13] Yu, J., Vuorinen, V., Hillamo, H., Sarjovaara, T., Kaario, O., Larmi, M. (2012), "An experimental study on high pressure pulsed jets for DI gas engine using planar laser-induced fluorescence". SAE Paper No. 2012-01-1655.
- [14] "Gasoline Fuel Injector Spray Measurement and Characterization". (2007), SAE, USA.
- [15] Settles, G.S. (2001), "Schlieren and Shadowgraph Techniques: Visualizing Phenomena in Transparent Media". Springer, Germany.
- [16] [www.jumo.net/attachments/JUMO/attachmentdownload?id=4772](http://www.jumo.net/attachments/JUMO/attachmentdownload?id=4772)
- [17] سلطانی، م. (۱۳۹۰)، طراحی و ساخت نمونه افشانه تزریق مستقیم گاز. پایان نامه کارشناسی، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران.
- [18] حاجی علی محمدی، ع.، سلطانی، م.، آقا میرسلیم، م. (۱۳۹۱)، طراحی، ساخت و آزمون نمونه افشانه تزریق مستقیم گاز برای استفاده در محفظه احتراقی حجم ثابت. اولین همایش ملی موتورهای درونسوز، سمنان.
- [19] Canny, J. (1986), "A computational approach to edge detection". IEEE Trans. on Pattern Anal. Mach. Intell., Vol. PAMI-8, No. 6, pp. 679-698.

## EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE TRANSIENT JET EMANATING FROM THE PROTOTYPE DIRECT GASEOUS INJECTOR

**A. Hajjalimohammadi<sup>1</sup>, A. Abdullah<sup>2,\*</sup>, S.M. Mirsalim<sup>3</sup>, I. Chitsaz<sup>4</sup>, M. Khalili<sup>5</sup>,  
M. Soltani<sup>5</sup>**

1. PhD Candidate, Faculty of Mechanical Engineering, Amirkabir University of Technology, and Iranakhodro Powertrain Company (IPCO), Tehran, Iran

2. Assistant Professor, Faculty of Mechanical Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran

3. Associate Professor, Faculty of Mechanical Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran

4. Iranakhodro Powertrain Company (IPCO), Tehran, Iran

5. BS Graduated, Faculty of Mechanical Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran

\*Corresponding Author: amirah@aut.ac.ir

---

### ARTICLE INFO

Keywords:

Direct Injection,  
Image Processing,  
Injector,  
Schlieren,  
Penetration Length,  
Gaseous Jet.

---

### ABSTRACT

In this paper, high speed Schlieren method was employed for measurement of geometrical characteristics of transient gaseous jet. Axial jet penetration and its angle versus time were calculated in pressure ratios of 2, 3 and 4 and three different nozzle diameters of 0.4, 0.5 and 0.6 mm using digital image processing method by analyzing of the Schlieren images of transient helium direct injection jet. For finding the edges of Schlieren images, Gaussian filter was applied to images. The J2715 SAE standard was used as a criterion for angle determination. Equivalent diameter was used for non-dimensional analysis of the penetration. Experimental results proved linear dependency of non-dimensional penetration to non-dimensional time with slope of 2.3-2.9. Angle measurement showed that jet angle would decrease after time passing from start of the injection and reaches a constant value at the end of injection. The turbulent stochastic behavior of the jet arise need for repeating the experiments until achieving acceptable results.

---