



## مطالعه تجربی اثر نسبت فشار و چگالی بر فواره تزریق مستقیم گاز از افشانه چندسوراخ

علیرضا حاجی علی محمدی<sup>۱\*</sup>، دیمون هونری<sup>۲</sup>، امیر عبدالله<sup>۳</sup>، سید مصطفی میرسلیم<sup>۴</sup>

<sup>۱</sup>دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر و شرکت تحقیق، طراحی و تولید موتور ایران خودرو (ایپکو)، تهران، ایران، [a\\_hajiali@aut.ac.ir](mailto:a_hajiali@aut.ac.ir)

<sup>۲</sup>دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه موناش، ملبورن، استرالیا، [damon.honnery@monash.edu](mailto:damon.honnery@monash.edu)

<sup>۳</sup>دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران، [amirah@aut.ac.ir](mailto:amirah@aut.ac.ir)

<sup>۴</sup>دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر و شرکت تحقیق، طراحی و تولید موتور ایران خودرو (ایپکو)، تهران، ایران، [mirsalim@csr.ir](mailto:mirsalim@csr.ir)

\*نویسنده مسئول، شماره تماس: ۰۹۱۳۴۵۵۱۲۶۴

### اطلاعات مقاله

### چکیده

تاریخچه مقاله:

دریافت: ۲۹ مرداد ۱۳۹۲

پذیرش: ۲۰ شهریور ۱۳۹۲

کلیدواژه‌ها:

تزریق مستقیم گاز

فواره گذرا

شیلرین

پردازش تصویر سریع

افشانه چندسوراخ

هدف از این پژوهش مطالعه اثر نسبت فشار و نسبت چگالی گاز تزریق به گاز داخل محفظه، روی عمق نفوذ محوری و شعاعی و سرعت لبه فواره خروجی از افشانه هفت سوراخ است. در موتورهای تزریق مستقیم گاز اشتعال جرقه‌ای، زمان شکل‌گیری بسیار کوتاه است. لذا تعیین دقیق خصوصیات فواره خروجی از افشانه در این موتورها ضرورت دارد. برای این منظور، عکسبرداری سریع با بزرگنمایی زیاد در منطقه نزدیک دماغه در بازه زمانی صفر تا ۰٫۸ میلی ثانیه با استفاده از روش شیلرین به عنوان روش آشکارساز فواره گازی شکل استفاده شد. عکس‌های فواره با استفاده از روش پردازش تصویر نرم‌افزاری بر مبنای روش لبه‌یابی، با نوشتن برنامه‌ای نرم‌افزاری تحلیل شدند. نتایج نشان دادند که با توجه به منحنی سرعت، شکل‌گیری فواره تزریق مستقیم گاز خروجی از افشانه چندسوراخ از سه مرحله اصلی نفوذ توده‌های تکی گاز، برخورد توده‌ها و نفوذ فواره اصلی، تشکیل شده است. تغییر چگالی گاز درون مخزن تأثیری روی زمان‌های رویداد نقاط حداقل و حداکثر سرعت ندارد. لکن در نسبت فشار ثابت با افزایش چگالی گاز داخل محفظه (کاهش نسبت چگالی گاز تزریق به گاز داخل محفظه) عمق نفوذ محوری و سرعت لبه فواره کاهش و عمق نفوذ شعاعی (زاویه گسترش) فواره افزایش می‌یابند.

تمامی حقوق برای انجمن علمی موتور ایران محفوظ است.

## ۱) مقدمه

یکی از مهم‌ترین چالش‌های توسعه‌ای موتورهای تزریق مستقیم، پایش شکل‌گیری مخلوط سوخت و هواست. در موتور تزریق مستقیم گاز اشتعال جرقه‌ای، تزریق گاز طبیعی فشار قوی در مدت زمان کوتاه در چرخه کاری موتور انجام می‌شود و مانند موتور تزریق مستقیم بنزینی، احتراق لایه‌ای<sup>۱</sup> در بارهای جزئی و احتراق مخلوط همگن<sup>۲</sup> در شرایط تمام‌بار وجود خواهد داشت. چون در موتورهای تزریق مستقیم گاز، سوخت مستقیماً داخل محفظه احتراق تزریق می‌شود، مخلوط سوخت و هوای درون 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 [۱]. این مساله بویژه در عملکرد موتور در حالت احتراق لایه‌ای اهمیت ویژه‌ای دارد. در اینگونه موتورها، روش‌های مختلفی برای شکل‌گیری مخلوط استفاده می‌شوند: هدایت دیواره، هوا و فواره. از میان این سه روش، روش هدایت فواره بیشترین قابلیت را برای ایجاد احتراق لایه‌ای دارد. در این روش، ویژگی‌های افشانه، تأثیر زیادی در مدت زمان تهیه مخلوط سوخت و هوا دارد. بنابراین شناخت دقیق تأثیر متغیرهای مختلف روی فواره خروجی از افشانه می‌تواند گام مهمی در راه طراحی و توسعه اینگونه موتورها باشد. شاخص‌های اصلی در شکل‌گیری فواره عبارتند از: طراحی افشانه و سازوکار عملکردی آن، شکل سوراخ‌های افشانه، نسبت فشار و چگالی گاز تزریق به گاز درون محفظه.

گاهی در طراحی موتور برای اجتناب از برخورد فواره با دیواره‌های محفظه احتراق و تاج سمبه نیاز به عمق نفوذ کمتر و گاهی برای هدایت صحیح آن به سمت تاج سمبه و اختلاط بیشتر سوخت و هوا عمق نفوذ بیشتر نیاز است. در نتیجه لازم است عمق نفوذ فواره در راستای شعاعی و محوری و سرعت لبه پشنتاز آن بدقت بر حسب زمان تحت شرایط مختلف تعیین شود. تاکنون تحقیقات زیادی برای تعیین ویژگی‌های فواره تزریق مستقیم گاز انجام گرفته است. اولتی و هیل<sup>۳</sup> الگویی تحلیلی - تجربی بر مبنای الگوی توپ گردبادی ارائه دادند که عمق نفوذ فواره گذرای گاز را بتوان به کمک آن تحت شرایط مختلف تعیین نمود [۲]. ایشان تأثیر نسبت فشار بر عمق نفوذ فواره خروجی از افشانه تک سوراخ را آزمودند. پیودی<sup>۴</sup> و همکاران از روش تجربی فلورسانس ناشی از لیزر<sup>۵</sup> برای اندازه‌گیری عمق نفوذ محوری و شعاعی فواره تزریق مستقیم گاز استفاده نمودند. آن‌ها عمق نفوذ محوری و شعاعی را تنها برای یک حالت اندازه‌گیری نمودند و حالت‌های مختلف را بررسی نکردند [۳]. روش شیلرین به همراه

پردازش تصویر نرم افزاری<sup>۶</sup> برای اندازه‌گیری عمق نفوذ و زاویه فواره تزریق مستقیم گاز<sup>۷</sup> (ف.ت.م.گ) سی‌ان‌جی<sup>۸</sup> خروجی از شمع افشانه<sup>۹</sup>، را چنان<sup>۱۰</sup> و همکاران استفاده کردند [۴]. تمرکز اصلی این تحقیق روی احتراق لایه‌ای موضعی<sup>۱۱</sup> بود، لذا تحلیل خاصی روی داده‌های تجربی انجام ندادند و بین روش‌های تحلیلی - تجربی مقایسه‌ای انجام نشد و آزمون‌ها محدود به اندازه‌گیری عمق نفوذ در ناحیه دور از دماغه (محدوده صفر تا ۸۰ برابر  $d_n$ ) بود. تزریق مستقیم نیتروژن داخل محفظه حجم ثابت حاوی نیتروژن با فشارهای تزریق ۵۰، ۶۰ و ۸۰ اتمسفر و فشار ۱ اتمسفر محفظه حجم ثابت و اندازه‌گیری عمق نفوذ و زاویه فواره به روش فلورسانس به وسیله لیزر، طیب اسکندر و همکاران انجام دادند [۵].

مطالعه خصوصیات هندسی و میدان سرعت ف.ت.م.گ را باثرت<sup>۱۲</sup> و همکاران انجام دادند. آن‌ها به دلایل ایمنی از نیتروژن (به عنوان گاز تزریق و گاز درون محفظه حجم ثابت نوری<sup>۱۳</sup>) استفاده نمودند [۶]. آن‌ها روش‌های لیزری سرعت سنجی را به کمک ذرات نشانگر<sup>۱۴</sup> برای اندازه‌گیری میدان سرعت داخل فواره و پخش مای<sup>۱۵</sup> برای اندازه‌گیری ویژگی‌های فواره (عمق نفوذ و زاویه) بکار گرفتند. یو<sup>۱۶</sup> و همکاران نیز، با استفاده از روش فلورسانس ناشی از لیزر، تأثیر نسبت فشار، فشار محفظه و قطر سوراخ خروجی دماغه را روی عمق نفوذ و سرعت لبه افشانه تک سوراخ در ناحیه دور مطالعه کردند [۷]. آن‌ها نشان دادند افت فشار بالادست به پایین دست دماغه در هنگام تزریق گذرا ممکن است نسبت فشار واقعی را تا نصف نسبت فشار تنظیم شده کاهش دهد. آن‌ها در کارهای قبلی اثر قطر سوراخ خروجی دماغه و نسبت فشار را روی عمق نفوذ محوری، سرعت لبه و زاویه ف.ت.م.گ بررسی کردند [۸-۹]. در تحقیق قبلی تأثیر نسبت فشار روی متغیرهای یاد شده به روش تجربی برای افشانه چندسوراخ در دو ناحیه دور و نزدیک دماغه مطالعه شد [۱۰].

در تحقیق حاضر و به عنوان ادامه کار قبلی، تأثیر نسبت چگالی گاز تزریق به گاز داخل محفظه احتراق بر عمق نفوذ محوری، شعاعی و سرعت لبه مطالعه شد. آزمون‌های این پژوهش به شکلی طراحی شده‌اند که به جای استفاده از محفظه حجم ثابت نوری حاوی هوای پرفشار، از محفظه‌ای ساده‌تر حاوی گاز سنگین تر SF6 استفاده شود.

6 Digital Image Processing

7 Spray-guided direct injection gaseous

8 Compressed Natural Gas (CNG)

9 Spark Plug Fuel Injector

10 E.C. Chan

11 Partially Stratified Combustion

12 R. Baert

13 Optical

14 Particle Image Velocimetry (PIV)

15 Planar Laser Mie Scattering (PLMS)

16 J. Yu

1 Stratified combustion

2 Homogeneous Combustion

3 P.G. Hill and P. Ouellette

4 M. Chiodi

5 Laser Induced Fluorescence (LIF)

## ۲) مجموعه آزمایشی

### ۲-۱) تجهیزات عکسبرداری سریع

برای آشکارسازی فواره گذرای گاز با توجه به بی رنگ بودنش از روش شیلرین استفاده شد. روش شیلرین به عنوان یک روش مرسوم در مطالعه فواره‌های گاز پایا به طور وسیع استفاده شد. در این تحقیق این روش با فناوری عکسبرداری سریع تلفیق شده تا تصاویر فواره گذرای گاز را ثبت نماید. تصویر میز آزمون در شکل ۱ نشان داده شده است. 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. معادله بین چگالی گاز و ضریب شکست نور عبوری از آن بدین صورت بیان می‌شود [۱۱]:

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

که  $n$  ضریب شکست نور،  $k_G$  ثابت گلدستون دیل و  $\rho$  چگالی گاز است. در آزمون‌ها از گاز هلیوم استفاده شد. به دلیل اختلاف ضریب شکست نور گازهای هلیوم و هوا در تصاویر شیلرین، وقتی این گاز در هوا تزریق شود، گاز هلیوم بخوبی قابل تشخیص است. دلایل دیگر استفاده از گاز هلیوم، نزدیک بودن چگالی آن به گاز هیدروژن (به عنوان یک سوخت در موتورهای تزریق مستقیم گاز) و ایمنی آن به دلیل بی‌اثر بودنش بود. در شکل ۲ برخی از اجزای میز آزمون نشان داده شده‌اند.

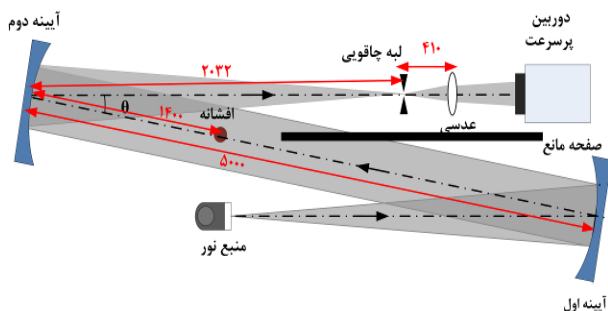
همان‌طور که در شکل ۱ مشخص است، زاویه بین راستای پرتوهای موازی و راستای قرارگیری دوربین، عدسی و لبه چاقویی (زاویه  $\theta$  در شکل ۱) برای این چیدمان برابر ۶ درجه بود. فاصله کانونی آینه‌ها برابر ۲۰۳۲ میلی‌متر و قطر آن‌ها برابر ۲۰۰ میلی‌متر بود. فاصله بین عدسی و دوربین سریع در آزمون‌ها متغیر بود و به فاصله کانونی عدسی بستگی داشت. آزمون‌ها برای مطالعه ناحیه نزدیک افشانه (محدوده  $14.6 \times 12.1$  میلی‌متر مربع پایین دست نوک افشانه) انجام گرفت و برای افزایش بزرگنمایی از عدسی با فاصله کانونی ۳۰۰۰ میلی‌متر استفاده شد.

در آزمون‌ها از دوربین سریع Shimadzu Hyper Vision HPV-1 استفاده شد. این دوربین قابلیت عکسبرداری تا سرعت ۱ میلیون عکس بر ثانیه را دارد. قدرت تفکیک عکس‌ها در همه سرعت‌های عکسبرداری برابر  $260 \times 312$  پیکسل می‌باشد [۱۲]. عکسبرداری با سرعت ۱۲۵۰۰۰ عکس بر ثانیه انجام شد که به معنی ثبت عکس از فواره در فواصل زمانی ۸ میکروثانیه‌ای است.

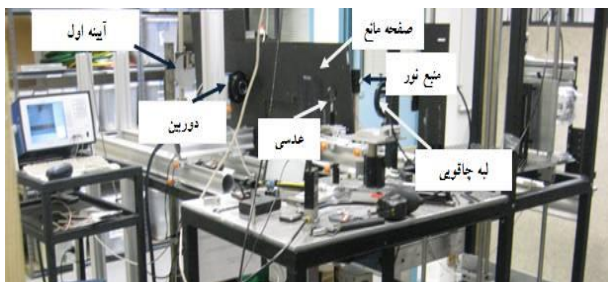
برای آزمون‌ها از افشانه چندسوراخه Bosch (مدل HDEV5) استفاده شد. این افشانه دارای ۷ سوراخ به قطر ۰٫۳۸ میلی‌متر می‌باشد. مراکز این سوراخ‌ها مطابق شکل ۲ روی دایره‌ای به قطر ۱٫۲۷ میلی‌متر قرار دارد. همان‌طور که در این شکل مشخص شده است، زاویه بین سوراخ‌های بالایی قطر ۶۰ درجه و سوراخ‌هایی پایین آن ۴۵ درجه

می‌باشد (شکل ۳) [۱۳]. در آزمون‌ها دمایی گاز تزریق ۲۹۲ درجه کلوین و فشار گاز داخل محفظه فشار هوای محیط برابر ۱٫۰۱۳۵ اتمسفر بود.

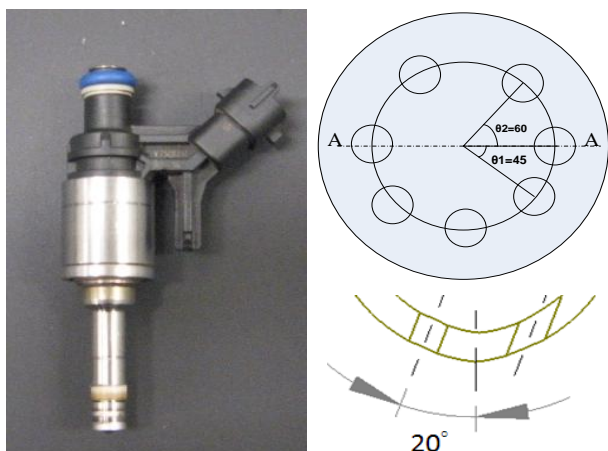
با توجه به این‌که در آزمون‌های شیلرین با سرعت عکسبرداری بسیار تند، زمان نور پذیری دوربین بسیار کوتاه (برای این آزمون‌ها برابر ۴ میکروثانیه) است، برای آزمون‌ها باید حتماً از منبع نوری استفاده شود که بتواند نور لازم دوربین عکسبرداری را تأمین کند. بنابراین با توجه به سرعت عکسبرداری ۱۲۵ هزار عکس بر ثانیه از نورپرداز عکسبرداری Metz Mecablitz 44 AF-4i استفاده شد [۱۴]. این نورپرداز در فاصله زمانی کوتاهی نور زیادی را تأمین می‌نمود و برای عکسبرداری خیلی سریع بسیار مناسب است.



شکل ۱: چیدمان و فواصل تجهیزات آزمون شیلرین (ابعاد به میلی‌متر)



شکل ۲: اجزای میز آزمون



شکل ۳: افشانه چندسوراخ و طرز قرارگیری سوراخ‌ها

## ۲-۲) محفظه تزریق گاز

برای مطالعه اثر نسبت چگالی روی شکل‌گیری ف.ت.م.گ، تزریق گاز هلیوم در هوای محیط و در محفظه ای حاوی گاز سنگین SF6 انجام گرفت. نسبت چگالی گاز تزریق به گاز محفظه برای حالتی که گازها در فشار اتمسفری قرار داشته باشند برای این دو حالت بترتیب ۰,۱۴۰ و ۰,۲۷ بود. برای این منظور، محفظه‌ای مکعبی حجم ثابت از جنس شیشه پلکسی به ابعاد ۱۴۰ میلی متر، ۲۶۰ میلی متر و ۲۴۰ میلی متر طراحی و ساخته شد. همان طور که در شکل ۴ نشان داده شده است، افشانه وسط سقف محفظه از طریق یک قطعه واسط متصل شد تا تزریق گاز هلیوم با نسبت فشارهای ۲، ۳، ۴ و ۵ درون محفظه حجم ثابت حاوی SF6 با فشار محیط انجام گیرد. گاز SF6 هم از طریق یک لوله از جنس فولاد ضد زنگ به قطر خارجی ۶,۳۸ میلی متر و قطر داخلی ۴,۳۸ میلی متر و به طول ۲۳۰ میلی متر وارد محفظه شد. فرایند پر کردن طوری طراحی شد که گاز سنگین (SF6) از طریق لوله از پایین محفظه بتدریج وارد شده و گاز سبک (هوا) را به بیرون براند. این فرآیند تا جایی ادامه پیدا کرد تا تمام هوای داخل محفظه تخلیه شده و تمام فضای محفظه را گاز سنگین پر کند. حجم محفظه به اندازه کافی بزرگ انتخاب شد تا پس از هر تزریق، اختلاط هلیوم تزریق شده با SF6 موجود در محفظه تأثیر کمی روی خصوصیات گاز درون مخزن بگذارد. البته چون تعداد تکرارها ۱۵۰ مرتبه بود، بعد از هر ۲۰ تزریق، گاز SF6 موجود در محفظه با هلیوم تزریق شده، رقیق می‌شد و این موضوع به طور واضح در عکس‌های فواره مشخص بود. بنابراین نیاز بود دوباره مقداری گاز SF6 به درون محفظه وارد شود تا گاز هلیوم موجود را به بیرون براند. مسأله بسیار مهم دیگر در طراحی محفظه، این بود که در قسمتی از محفظه که نور از آن عبور می‌کند به دلیل غیر یکنواخت بودن ساختار شیشه پلکسی، شکست نور ایجاد شده و امکان تشخیص فواره گاز در عکس‌های شیلرین وجود نداشت. بنابراین در این ناحیه از محفظه همان طور که در شکل ۴ مشخص شده است، پنجره‌ای از جنس شیشه نورانی جایگزین پلکسی شد.

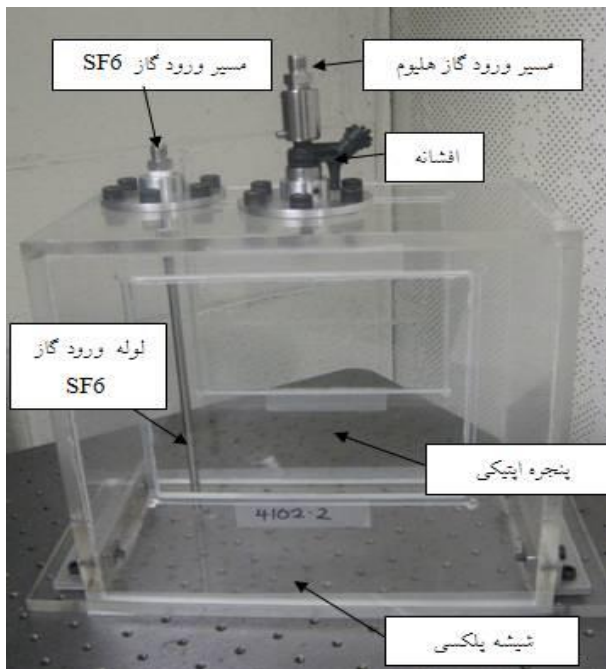
## ۳) نتایج

### ۳-۱) عمق نفوذ فواره

مشاهدات حاصل از عکسبرداری برای این حالت که نسبت چگالی (چگالی گاز تزریق به گاز موجود در محفظه) ۰,۲ نسبت چگالی تزریق هلیوم در هوا بود، نشان داد که اولاً به دلیل تفاوت بیشتر در چگالی و در نتیجه ضریب شکست بیشتر نور، تصاویر فواره، وضوح بیشتری داشتند و فواره بروشنی در زمینه تصاویر مشخص بود.

در شکل ۵ مشخص است که در زمان ۵۶ میکروثانیه به عنوان مثال توده‌های<sup>۱</sup> تکی گاز در تصاویر تزریق در SF6 کاملاً واضح می‌باشند. ثانیاً همان طور که در شکل ۵ نشان داده شده است، با افزایش چگالی گاز درون مخزن، عمق نفوذ شعاعی فواره با سرعت بیشتری نسبت به عمق نفوذ محوری افزایش می‌یابد. به عبارت دیگر در عمق نفوذ محوری یکسان، عمق نفوذ شعاعی فواره‌ای که به درون مخزن با چگالی گاز بیشتر تزریق شده باشد، بیشتر می‌شود. برای پردازش تصاویر با استفاده از روش لبه‌یابی Canny، تصویر فواره به یک تصویر دودویی<sup>۲</sup> سیاه و سفید حاوی لبه‌های فواره تقسیم بندی شد و لبه<sup>۳</sup> پیش‌تاز فواره و مرزهای آن با استفاده از همین عکس دودویی با نوشتن برنامه‌ای در نرم افزار متلب<sup>۳</sup> محاسبه شد.

نمونه‌ای از عکس فواره و عکس دودویی متناظر آن در شکل ۶ نشان داده شده است. در شکل ۷ عمق نفوذ محوری نوک فواره برای نسبت‌های مختلف فشار و برای دو حالت تزریق در هوا و گاز SF6 که از تحلیل عکس‌ها بدست آمده است، نشان داده شده است. با توجه به نتایج عمق نفوذ محوری فواره برای دو حالت تزریق در هوا و تزریق در گاز SF6 مشخص است که برای هر دو حالت عمق نفوذ با افزایش نسبت فشار گاز تزریق به فشار گاز داخل محفظه افزایش می‌یابد و در نسبت فشار ثابت، مقادیر عمق نفوذ محوری برای حالتی که تزریق در هوا انجام شده باشد بمراتب بزرگتر از حالتی است که تزریق در SF6 انجام گرفته است.



شکل ۴: قسمت‌های مختلف محفظه شفاف حجم ثابت

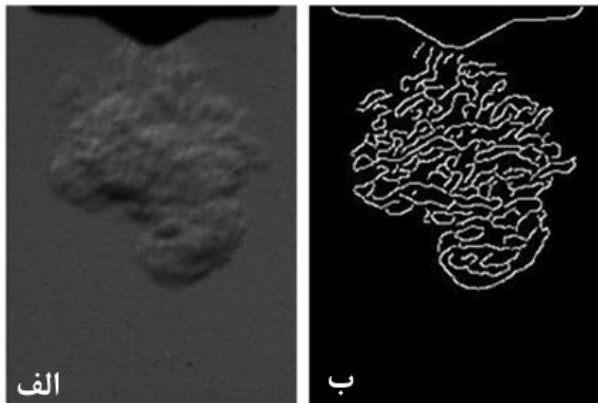
1 Plume

2 Binary

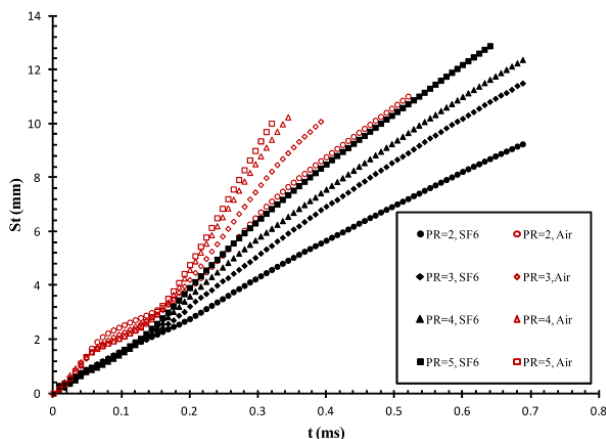
3 MATLAB

برای تعیین تعداد تکرارهای تزریق لازم و عکسبرداری، از معیار عدم قطعیت نتایج بدین صورت استفاده شد که ابتدا تحلیل عکس های ۲۰ مجموعه تزریق انجام شده و مقادیر میانگین، انحراف معیار، RMS ها و عدم قطعیت ها برای عمق نفوذ و سرعت لبه محاسبه شد سپس به این ۲۰ مجموعه عکس ۲۰ مجموعه عکس دیگر نیز اضافه شد تا در مجموع ۴۰ مجموعه عکس ۴۰ تزریق مختلف تحلیل شود و مقادیر میانگین، انحراف معیار، RMS ها و عدم قطعیت های مجموعه ۴۰ تایی جدید محاسبه شد. این فرایند تا جایی ادامه یافت که عدم قطعیت عمق نفوذ و سرعت لبه فواره برای تمام زمان ها از شروع تزریق به کمتر از ۵٪± برسد.

در واقع با توجه به ثابت ماندن فشار تزریق در موتور تزریق مستقیم گاز و ثابت نبودن فشار محفظه احتراق در هنگام تزریق، در دورها و بارهای مختلف عملکردی موتور، نتایج بدست آمده از این آزمون می تواند نشان دهد که خصوصیات ف.ت.م.گ (بر خلاف شار جرمی افشانه که مقدار ثابتی دارد [۱۶]) در شرایط مختلف عملکردی موتور می تواند متفاوت باشد.



شکل ۶: نمونه عکس فواره و (ب) تصویر دودویی لبه ای متناظر با آن



شکل ۷: مقایسه نمودارهای میانگین عمق نفوذ محوری لبه فواره بر حسب زمان برای دو حالت تزریق در هوا و تزریق در گاز SF6 برای نسبتهای مختلف فشار

| t (μs) | تزریق در هوا | SF6 در تزریق |
|--------|--------------|--------------|
| 56     |              |              |
| 120    |              |              |
| 184    |              |              |
| 248    |              |              |
| 312    |              |              |
| 376    |              |              |
| 440    |              |              |

شکل ۵: مقایسه تصاویر متعلق به توسعه فواره در ناحیه برای دو حالت تزریق در هوا و تزریق در گاز SF6 برای نسبت فشار ۳ و زمان های مختلف پس از شروع تزریق

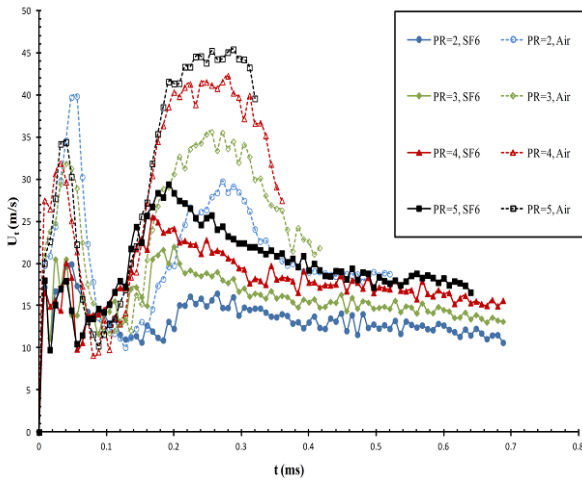
همچنین برای هر دو حالت در بازه زمانی صفر تا ۰,۱۴ میلی ثانیه عمق نفوذ مستقل از نسبت فشار است و تنها تابعی است از نسبت چگالی. در اینجا شایان ذکر است که بدلیل آماری بودن خصوصیات ف.ت.م.گ از قبیل عمق نفوذ، سرعت لبه و زاویه که در مقاله قبلی مولفان بدان اشاره شده است [۸]. برای دستیابی به عدم قطعیت کمتر از ۵± درصد در نتایج عمق نفوذ و سرعت لبه تزریق برای هر نسبت فشار ۱۵۰ مرتبه تکرار شد و نتایج شکل ۷ میانگین این ۱۵۰ تزریق می باشند. عدم قطعیت اندازه گیری ها (un) هم با توجه به معادله ۲ بدین صورت محاسبه می شود [۱۵]:

$$un = \frac{t_{\alpha, v} \cdot std}{\sqrt{N}} \quad (1)$$

که در آن  $t_{\alpha, v}$  مقدار تابع  $t$  در حد اهمیت  $\alpha$ ،  $v$  درجه آزادی ( $v=N-1$ ) و  $std$  انحراف معیار متغیر اندازه گیری و  $N$  تعداد نمونه هاست. در این معادله مقدار  $\alpha$  برابر با ۰,۰۵ یعنی ۹۵ درصد بازه اطمینان<sup>۲</sup> فرض شد.

<sup>1</sup> Significance Level

<sup>2</sup> Confidence Interval



شکل ۸: سرعت لبه فواره بر حسب زمان پس از شروع تزریق برای نسبت‌های مختلف فشار و دو حالت تزریق در هوا و تزریق در گاز SF6

بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که نفوذ فواره از سه مرحله اصلی تشکیل شده است: در مرحله اول، توده‌های تکی ظاهر می‌شوند و نفوذ می‌کنند تا به هم برسند. مرحله دوم همان مرحله تشکیل فواره اصلی است که از برخورد توده‌های تکی تشکیل می‌شود. مرحله سوم هم، مرحله نفوذ فواره شکل گرفته است.

### ۳-۳ زاویه فواره

متغیر دیگری که محاسبه آن برای فواره اهمیت زیادی دارد، زاویه فواره است. تعاریف متعددی برای زاویه فواره در مراجع مختلف ارائه شده است. از جمله آن، تعریف متعلق به استاندارد SAE-J2715 است که در آن زاویه را بین خط واصل دو نقطه با فواصل ۵ و ۱۵ میلی متر روی فواره از دماغه و محور افشانه محاسبه می‌کند [۲۳]. روش دیگری که در برخی مراجع از آن استفاده شده است، زاویه خط واصل بین سه نقطه مرکز سوراخ افشانه و دو نقطه محل تقاطع خط عمود بر محور افشانه به فاصله  $S_t$  ۶۰٪ از دماغه و فواره را به عنوان زاویه فواره در نظر می‌گیرد ( $S_t$  عمق نفوذ لبه پیشرو فواره است) [۲۴]. حتی در برخی مراجع دو زاویه ناحیه نزدیک و ناحیه دور تعریف می‌شوند که اولی معیاری از رفتار پایا و دومی معیاری از رفتار گذرای فواره است [۲۵]. هر یک از این معیارها مشکلاتی برای اندازه‌گیری زاویه فواره ایجاد می‌کنند. معیار اول تنها برای فواره‌های پایا کاربرد دارد و تعریف دوم هم این مشکل را دارد که فواره حرکت کاملاً آشفته دارد و نمی‌توان یک نقطه را برای اندازه‌گیری ملاک قرار داد. از طرفی خط‌های پردازش تصویر و وجود گردبادهایی که ممکن است بعضاً در جریان شکل‌گیری فواره در لبه‌ها، در اثر حرکت آشفته بوجود بیایند، یافتن روند مشخصی را برای زاویه فواره با این تعریف مشکل می‌کند. در این مقاله پیشنهاد شده است که زاویه فواره با استفاده از یافتن گردباده و ناحیه شبه مخروطی پایا در روش توپ گردبادی تعیین شود. مطابق شکل ۹، فرایند پردازش تصویر بدین شکل است

### ۲-۳ سرعت لبه فواره

با توجه به محاسبه عمق نفوذ بر حسب زمان، برای یافتن سرعت لبه

در زمان  $t_i$  از معادله  $u = \frac{S_i - S_{i-1}}{\Delta t}$  و  $S_i$  و  $S_{i-1}$  عمق نفوذ در دو

زمان  $t_i$  و  $t_{i-1}$  و  $\Delta t$  فاصله زمانی بین دو عکس است) استفاده شد.

منحنی‌های میانگین سرعت لبه نسبت به زمان برای ۱۵۰ تکرار

انجام شده برای نسبت‌های مختلف فشار و دو حالت تزریق در هوا و

تزریق در گاز SF6 در شکل ۸ نشان داده شده اند. همان طور که در

شکل ۸ نشان داده شده است، سرعت لبه فواره رابطه پیچیده‌ای با

زمان دارد. در مراحل اولیه شکل‌گیری فواره، منحنی سرعت دارای دو

نقطه بیشینه است. بلافاصله پس از باز شدن افشانه و به هنگام نفوذ

تک توده‌ها، سرعت روند صعودی دارد. سپس برخورد توده‌ها باعث

تبادل اندازه حرکت بین آن‌ها و همچنین با محیط اطراف می‌شود

[۱۷]. بنابراین انتظار می‌رود هنگام این رویداد، سرعت لبه فواره

کاهش یابد [۱۸-۲۰]. پس از برخورد توده‌ها و تشکیل فواره اصلی،

سرعت فواره با نرخ زیادی تا زمان ۱۰۰ میکروثانیه کاهش می‌یابد. در

این زمان سرعت فواره برای تمامی نسبت فشارها تقریباً ۱۰ متر بر

ثانیه می‌شود. حساسیت سرعت لبه به نسبت فشار در این بازه زمانی

(صفر تا ۱۰۰ میکرو ثانیه) به خاطر بزرگ بودن عدم قطعیت نتایج تا

حد زیادی کاهش می‌یابد. نقطه بیشینه دوم سرعت در شکل ۸ تقریباً

مصادف با پایان فرایند باز شدن افشانه است. مانند هر افشانه تجاری

دیگر، فرآیند باز شدن افشانه اهمیت زیادی در مراحل اولیه شکل‌گیری

فواره دارد. همچنین این فرآیند روی ضریب جریان افشانه هم اثر

می‌گذارد [۲۱]. برای نمونه ممکن است باعث تقدم در ایجاد بعضی

توده‌ها شود. زمان باز شدن افشانه زمانی است که سوزن افشانه به

اندازه کافی برخیزد تا بزرگترین مقطع عبور جریان در سوراخ‌های

خروجی دماغه باشد و در این زمان بیشترین شار جرمی جریان برای

فشار تنظیم شده از افشانه خارج می‌شود. به طور کلی در ابتدای فرآیند

شکل‌گیری فواره که مصادف با باز شدن افشانه و حرکت سوزن آن

(از ابتدا تا انتهای مسیر خود) می‌باشد، افشانه تکرار پذیر عمل

نمی‌کند. زمان خیز سوزن برای افشانه در این آزمون‌ها برابر ۰٫۲

میلی ثانیه اندازه‌گیری شد. روش اندازه‌گیری خیز سوزن افشانه

اتصال حسگر شتاب سنج به بدنه افشانه و تحلیل منحنی شتاب

شتاب‌سنج که در اثر حرکت سوزن ایجاد می‌شود، می‌باشد [۲۲].

بررسی شکل ۸ همچنین نشان می‌دهد که سرعت لبه فواره با افزایش

نسبت چگالی گاز تزریق به گاز داخل محفظه حجم ثابت افزایش

می‌یابد. مقایسه منحنی‌های سرعت برای ناحیه نزدیک فواره برای دو

حالت تزریق در هوا و گاز SF6 نشان می‌دهد که زمان‌های رویداد

نقاط بیشینه و کمینه سرعت تقریباً یکسان اند. البته برای زمان نقطه

بیشینه دوم برای دو حالت کمی تفاوت وجود دارد که دلیل آن

می‌تواند تأثیر نسبت چگالی روی زمان باز شدن سوزن افشانه باشد.

#### ۴ نتیجه گیری

در این مقاله اثر تغییر نسبت چگالی گاز تزریق به گاز درون محفظه احتراق که در شرایط کاری مختلف موتور تزریق مستقیم گاز اتفاق می افتد روی خصوصیات فواره گذرای گاز مطالعه شد. روش آزمونی بدین صورت بود که تزریق گاز هلیوم با نسبت فشارهای مختلف داخل هوای محیط و محفظه‌ای با فشار محیط حاوی گاز سنگین SF6 انجام گرفت. برای محاسبه عمق نفوذ محوری و شعاعی فواره حاصل و سرعت لبه فواره از فواره عکسبرداری شد. این عکسبرداری بسیار سریع، از ناحیه نزدیک افشانه هفت سوراخ انجام شد. با توجه به منحنی سرعت، شکل‌گیری ف.ت.م.گ خروجی از افشانه چندسوراخ از سه مرحله اصلی نفوذ توده‌های تکی، برخورد توده‌ها و نفوذ فواره اصلی تشکیل شده است. تغییر چگالی گاز درون مخزن تأثیری روی زمان‌های رویداد نقاط حداقل و حداکثر سرعت ندارد. اما در نسبت فشار ثابت با افزایش چگالی گاز داخل محفظه (کاهش نسبت چگالی گاز تزریق به گاز داخل محفظه) عمق نفوذ محوری و سرعت لبه فواره کاهش می‌یابد ولی عمق نفوذ شعاعی (زاویه گسترش) فواره افزایش می‌یابد.

#### تشکر و قدردانی

نویسندگان از همکاری صمیمانه تمام اعضای آزمایشگاه LTRAC دانشکده مکانیک دانشگاه موناخ کمال تشکر را دارند. همچنین از مرکز تحقیق، طراحی و تولید موتور ایران خودرو و دانشگاه موناخ به سبب حمایت مالی طرح قدردانی می‌نمایند.

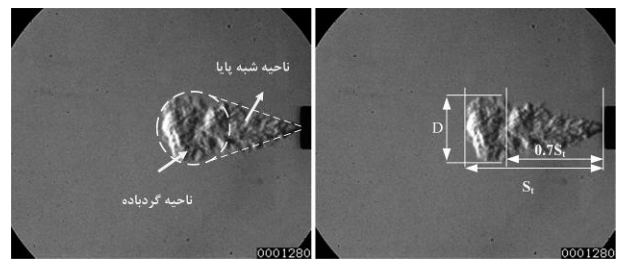
#### فهرست علائم

|        |                                 |
|--------|---------------------------------|
| $D$    | قطر گردباده فواره، m            |
| $D_n$  | قطر بی بعد گردباده فواره        |
| $d_n$  | قطر سوراخ خروجی دماغه، m        |
| $S_t$  | عمق نفوذ محوری میانگین فواره، m |
| $s$    | عمق نفوذ محوری فواره، m         |
| $t$    | زمان، s                         |
| $U_t$  | سرعت لبه فواره، m/s             |
| $k_G$  | ضریب گلدستون دیل، $m^3/kg$      |
| $n$    | ضریب شکست نور                   |
|        | <b>علائم یونانی</b>             |
| $\rho$ | چگالی، $kg/m^3$                 |

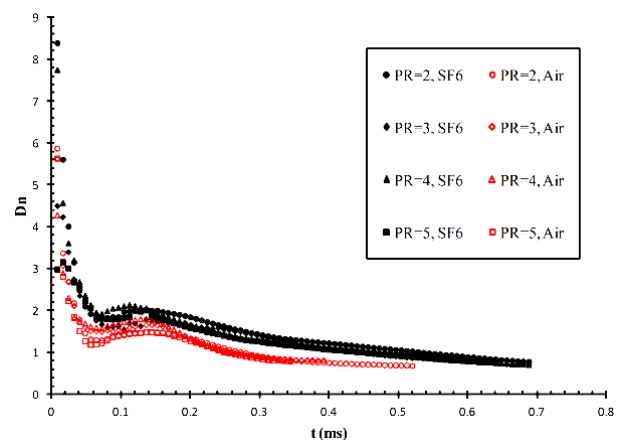
#### References

[1] F. Zhao, D.L. Harrington, M. La, Automotive spark-ignited direct-injection gasoline engines, Warrendale: Society of Automobile Engineers Inc, 2002

که ابتدا از ناحیه  $0.7S_t$  تا  $S_t$  خطی بر محور فواره عمود می‌شود و محل تلاقی آن با مرز فواره تعیین می‌شود سپس این خط تا لبه فواره حرکت می‌کند و محل‌های تلاقی در فواصل مختلف مشخص می‌شوند و حداکثر فاصله دو نقطه تلاقی قطری به عنوان قطر فواره در نظر گرفته می‌شود. دلیل انتخاب ناحیه  $0.7S_t$  تا  $S_t$  برای جارو، پیشنهاد اولتی برای نسبت  $D/S_t$  است که برای فواره‌های گذرا عدد ثابت  $0.25 \pm 0.05$  را ارائه نمود [۲]. نتایج متعلق به عمق نفوذ شعاعی بی بعد در شکل ۹ نشان داده شده‌اند. در شکل مشخص است که این متغیر که در واقع بیانگر زاویه فواره است برای حالت تزریق در SF6 برای نسبت‌های مختلف فشار بیشتر از حالت تزریق در هواست. به عبارت دیگر زاویه فواره گذرای خروجی تزریق مستقیم گاز با کاهش نسبت چگالی گاز تزریق به چگالی گاز محفظه (افزایش چگالی گاز درون محفظه) افزایش می‌یابد. همان طور که در این شکل نشان داده شده است برای هر دو حالت تزریق در هوا و تزریق در گاز SF6 عمق نفوذ شعاعی بی بعد در ابتدای باز شدن افشانه بزرگ است و این بدین معنی است که در ابتدا فواره پس از خروج از سوراخ دماغه تمایل دارد در راستای شعاعی گسترش یابد. بتدریج و با گذشت زمان عمق نفوذ شعاعی بی بعد کاهش می‌یابد و در زمان‌های انتهایی تزریق بمقدار ثابتی می‌رسد.



شکل ۸: تفکیک ساختار فواره با استفاده از الگوی توپ گردبادی و روش اندازه‌گیری قطر بیشینه فواره



شکل ۹: مقایسه نمودارهای عمق نفوذ شعاعی بی بعد فواره بر حسب زمان برای دو حالت تزریق در هوا و تزریق در گاز SF6 برای نسبت‌های مختلف فشار

- [13] [http://www.bosch-motorsport.de/pdf/components/injection\\_valves\\_hp/hdev\\_5.pdf](http://www.bosch-motorsport.de/pdf/components/injection_valves_hp/hdev_5.pdf)
- [14] [http://www.metzflash.co.uk/pdffiles/44\\_AF-4iN\\_GB.pdf](http://www.metzflash.co.uk/pdffiles/44_AF-4iN_GB.pdf)
- [15] E. Avallone, T. Baumeister, A. Sadegh, Marks' standard handbook for mechanical engineers, McGraw-Hill, 2007
- [16] D. Caley, G. Cathcart, Development of a natural gas spark ignited direct injection combustion system, NGV Conference, Egypt, November 7-9, 2006
- [17] K. Nishida, J. Tian, Y. Sumoto, W. Long, K. Sato, K. Yamakawa, An experimental and numerical study on sprays injected from two-hole nozzles for DISI engines, Fuel, Vol. 89, pp. 3287-3299, 2010
- [18] S. Moon, Y. Matsumoto, K. Nishida, J. Gao, Gas entrainment characteristics of diesel spray injected by a group-hole nozzle, Fuel, Vol. 89, pp. 3287-3299, 2010
- [19] P.G. Aleiferis, Z.R. van Romunde, An analysis of spray development with iso-octane, n-pentane, gasoline, ethanol and n-butanol from a multi-hole injector under hot fuel conditions, Fuel, Vol. 105, pp. 143-68, 2013
- [20] W. Zeng, M. Xu, G. Zhang, Y. Zhang, D.J. Cleary, Atomization and vaporization for flash-boiling multi-hole sprays with alcohol fuels, Fuel, Vol. 95, pp. 287-297, 2012
- [21] J. Kostas, D. Honnery, J. Soria, A. Kastengren, Z. Liu, C.F. Powell, J. Wang, Effect of nozzle transients and compressibility on the penetration of fuel sprays, Applied Physics Letters, Vol. 95, p 024101, 2009
- [22] J. Le, K. Min, Pressure injector driven by piezo actuator for common-rail injection system, KSME International Journal, Vol. 19, pp. 1194-1205, 2005
- [23] Gasoline Fuel Injector Spray Measurement and Characterization, SAE Standard, No. J2715, 2007
- [24] J. Kostas, D. Honnery, J. Soria, A correlation image velocimetry-based study of high-pressure fuel spray tip evolution, Exp Fluids, Vol. 51, pp. 667-678, 2011
- [25] J. Shao, Y. Yan, G. Greeves, S. Smith, Quantitative characterization of diesel sprays using digital imaging techniques, Measurement Science Technology, Vol. 1, pp. 1110-1116, 2003
- [2] P.G. Hill, P. Ouellette, Transient turbulent gaseous fuel jets for diesel engines, Journal of Fluids Engineering, Vol. 121, No. 1, pp. 93-101, 1999
- [3] M. Chiodi, H.J. Berner, H.M. Bargende, Investigation on different injection strategies in a direct-injected turbocharged CNG-engine, SAE Paper No. 2006-01-3000, 2006
- [4] E.C. Chan, R.L. Evan, M.H. Davy, S. Cordiner, Pre-ignition characterization of partially-stratified natural gas injection, JSAE 20077252, 2007
- [5] T.I. Mohamad, M. Harrison, M. Jermy, H.G. How, The structure of the high-pressure gas jet from a spark plug fuel injector for direct fuel injection, Journal of Visualization, Vol. 13, No. 2, pp. 121-131, 2009
- [6] R. Baert, A. Klaassen, Direct injection of high pressure gas: scaling properties of pulsed turbulent jets, SAE paper No. 2010-01-2253, 2010
- [7] J. Yu, V. Vuorinen, H. Hillamo, T. Sarjoavaara, O. Kaario, M. Larmi, An experimental study on high pressure pulsed jets for DI gas engine using planar Laser-induced fluorescence, SAE paper No. 2012-01-1655, 2012
- [8] A. Hajjalimohammadi, A. Abdullah, S.M. Mirsalim, I. Chitsaz, M. Khalili, M. Soltani, Experimental investigation of the transient jet emanating from the prototype direct gaseous injector, Journal of Modeling in Engineering, Vol. 9, No. 25, pp. 21-31, 2011
- [9] I. Chitsaz, M.H. Saidi, A.A. Mozafari, A. Hajjalimohammadi, Experimental and numerical investigation on the jet characteristics of spark ignition direct injection gaseous injector, Applied Energy, Vol. 105, pp. 8-16, 2013
- [10] A. Hajjalimohammadi, D. Honnery, A. Abdullah, M. Agha Mirsalim, Time resolved characteristics of gaseous jet injected by a group-hole nozzle, Fuel, Vol. 113, pp. 497-505, 2013
- [11] G.S. Settles, Schlieren and Shadowgraph Techniques: Visualizing Phenomena in Transparent Media, Springer, 2001
- [12] T. Goji Etoh, D. Poggemann, G. Kreider, H. Mutoh, A.J.P. Theuwissen, A. Ruckelshausen, Y. Kondo, H. Maruno, K. Takubo, H. Soya, K. Takehara, T. Okinaka, Y. Takano, An image sensor which captures 100 consecutive frames at 1 000 000 frames/s, IEEE Transactions on Electron Devices, Vol. 50, No. 1, pp. 144-151, 2003



# The Journal of Engine Research

Journal Homepage: [www.engineersearch.ir](http://www.engineersearch.ir)



## Experimental investigation of the effect of pressure and density ratio on the gaseous spray of the group-hole nozzle

A. Hajiali Mohammadi<sup>1\*</sup>, D. Honnery<sup>2</sup>, A. Abdullah<sup>3</sup>, S.M. Mirsalim<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Mechanical Engineering Faculty, Amirkabir University of Technology and Irankhodro Powertrain Company (IPCO), Tehran, Iran, [a\\_hajiali@aut.ac.ir](mailto:a_hajiali@aut.ac.ir)

<sup>2</sup>Laboratory for Turbulence Research in Aerospace and Combustion (LTRAC), Department of Mechanical and Aerospace Engineering, Melbourne, Australia, [damon.honnery@monash.edu](mailto:damon.honnery@monash.edu)

<sup>3</sup>Mechanical Engineering Faculty, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran, [amirah@aut.ac.ir](mailto:amirah@aut.ac.ir)

<sup>4</sup>Mechanical Engineering Faculty, Amirkabir University of Technology and Irankhodro Powertrain Company (IPCO), Tehran, Iran, [mirsalim@csr.ir](mailto:mirsalim@csr.ir)

\*Corresponding Author, Phone Number: +98-912-4551264

### ARTICLE INFO

#### Article history:

Received: 20 August 2013

Accepted: 11 September 2013

#### Keywords:

Transient jet

Direct injection

Schlieren

High speed imaging

Multi-hole injector

### ABSTRACT

The purpose of the present work is to investigate effects of the pressure ratio and the ratio of the injected gas density to the combustion chamber on its axial and radial penetration lengths and the tip velocity on a multi-hole gaseous injector. In direct injection gaseous fueled engines, very short times are available for the mixture preparation. Therefore, the exact determination of gaseous jet characteristics emanating from the injector is very important. For this objective, ultra high speed Schlieren imaging of the transient jet with high spatial and temporal resolutions were utilized. Jet images were analyzed by a digital image processing method based on the edge detection approach, using an in-house software. Results revealed that regarding to velocity curves, the formation of the multi-hole gaseous jet was comprised of three stages (including the emergence of individual plumes, merging and the penetration of the main spray). It was also found that changing the chamber gas density would not alter maximum and minimum times in velocity curves. Decreasing the density ratio of the injected gas into the chamber would decrease the axial penetration and the jet tip velocity and would increase the jet spreading angle.