



تحلیل حساسیت متغیرهای تأثیرگذار بر پردازش تصاویر فواره پرفشار گاز

علیرضا حاجی علی محمدی^{۱*}، دیمون هونری^۲، امیر عبدالله^۳، سید مصطفی میرسلیم^۴

^۱شرکت تحقیق، طراحی و تولید موتور ایران خودرو (اییکو)، تهران، ایران، a_hajiali@ip-co.com

^۲دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه موناش، ملبورن، استرالیا، damon.honnelly@monash.edu

^۳دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران، amirah@aut.ac.ir

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

*نویسنده مسئول، شماره تماس: ۰۹۱۳۴۵۵۱۲۶۴

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

دریافت: ۲۹ بهمن ۱۳۹۲

پذیرش: ۲۵ اسفند ۱۳۹۲

کلیدواژه‌ها:

پردازش تصویر

فواره گاز

لبه‌یابی

اوتسو

حد آستانه

چکیده

پردازش تصویر نرم‌افزاری، یکی از روش‌هایی است که امروزه می‌توان به کمک آن خصوصیات مختلف فواره سوخت موتورهای احتراق داخلی را تعیین نمود. روش عکسبرداری و کیفیت عکس‌ها دو عامل اصلی تعیین‌کننده دقت و صحت نتایج حاصل از این روش‌اند. در این مقاله، با توجه به استفاده از روش لبه‌یابی برای تحلیل تصاویر فواره گاز بدست آمده از روش شیلرین، تحلیل حساسیت اثر متغیرهای حدآستانه روش لبه‌یابی، ضریب مقیاس و درجه ماتمی و ناهنجاری موجود در تصاویر شیلرین فواره تزریق مستقیم گاز روی نتایج پردازش تصویر (عمق نفوذ و سرعت لبه فواره) مطالعه شد. ضمناً استفاده از روش اوتسو برای تعیین حدآستانه متغیر برای پردازش تصاویر شیلرین فواره گاز پیشنهاد شد. نتایج نشان دادند که حساسیت سرعت لبه فواره به حد آستانه‌ای که لبه فواره را از زمینه تصویر فواره جدا می‌کند (در محدوده مجاز حد آستانه) بسیار کم است و این حساسیت در مناطقی که سرعت لبه کندتر است، بیشتر می‌شود و ممکن است به ۱۴ درصد خطا بینجامد. همچنین، حساسیت عمق نفوذ فواره به مقدار ماتمی (با توزیع گوسی) کمتر از سرعت لبه است و حداکثر ۲ درصد خطا ممکن است در بیشترین ماتمی (انحراف معیار برابر ۴) اتفاق بیفتد ولی در همین شرایط تا ۲۸ درصد خطا در نتایج سرعت لبه ایجاد می‌شود.

تمامی حقوق برای انجمن علمی موتور ایران محفوظ است.

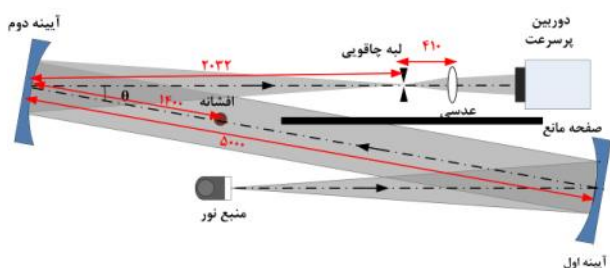
۱) مقدمه

در این مقاله در ادامه تحقیق‌های قبلی مؤلف، که برای تعیین خصوصیات کلان فواره گذرای گاز با استفاده از روش لبه یابی Canny بود [۱۱-۱۳]، قصد بر این است که متغیرهای مؤثر بر دقت نتایج پردازش تصویر روش لبه یابی تحلیل حساسیت شوند. در این راستا ابتدا تأثیر حد آستانه بر سرعت لبه با در نظر گرفتن حد آستانه های مختلف روش Canny مطالعه می‌شود. سپس تأثیر عدم تنظیم نور سامانه که اثر خود را از طریق وجود ماتی^۲ و ناهنجاری^۳ در عکس های فواره روی نتایج نهایی می‌گذارد، روی متغیرهای عمق نفوذ و سرعت لبه بررسی می‌شود.

۲) عکسبرداری سریع از فواره تزریق مستقیم گاز

چون جزییات مجموعه آزمایشی و روش آزمون استفاده شده برای عکسبرداری از فواره گذرای گاز در مراجع [۱۱-۱۳] آمده است در اینجا با توجه به اینکه هدف بیشتر تحلیل حساسیت روش پردازش تصویر است، تنها خلاصه ای از روش آزمون شرح داده شده است. برای آشکارسازی فواره گذرای گاز با توجه به بی رنگ بودنش از روش شیلرین استفاده شد. روش شیلرین به عنوان روش مرسوم در مطالعه فواره‌های گاز پایا به طور وسیع استفاده می‌شود. در این تحقیق این روش با فناوری عکسبرداری سریع تلفیق شد تا تصاویر فواره گذرای گاز را ثبت نماید. نمای مجموعه آزمایشی در شکل ۱ نشان داده شده است.

همان طور 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 می‌شود و از محل مورد نظر تصویربرداری (فواره گذرای گاز) عبور می‌کنند سپس برخورد پرتوهای موازی با آینه مقعر دوم باعث جمع شدن پرتوها در محل کانون آن می‌شود و پرتوهای اضافی با استفاده از لبه چاقویی جدا می‌شوند و پس از عبور از عدسی متصل به دوربین که وظیفه آن بزرگنمایی تصویر است، روی حسگر دوربین نقش می‌بندند و تصویر فواره گذرای گاز را ایجاد می‌کنند.



شکل ۱: نمای چیدمان تجهیزات آزمون شیلرین (ابعاد میلیمتر)

توسعه روش های پردازش تصویر نرم افزاری و پیشرفت هایی که در زمینه ساخت دوربین های سریع حاصل شده است، عکسبرداری از فواره گذرای سوخت و انتشار شعله را در موتورهای احتراق داخلی ممکن ساخته است. نتایج این عکسبرداری ها در قالب روش های مختلف می توانند خصوصیات مختلف فواره از قبیل اندازه و توزیع ریزقطره ها (برای سوخت های مایع)، میدان نسبت جرمی سوخت به هوا و سرعت فواره، عمق نفوذ، سرعت لبه و زاویه آن را تعیین نمایند [۱]. شناخت دقیق خصوصیات فواره مخصوصاً در موتورهای دیزل و تزریق مستقیم که در آن ها تزریق سوخت مستقیماً داخل محفظه احتراق انجام می گیرد، اهمیت ویژه ای دارد.

با توجه به بی رنگ بودن گاز یکی از روش هایی که برای آشکارسازی فواره آن در موتورهای تزریق مستقیم گاز اشتعال جرقه ای استفاده می شود، روش شیلرین است [۲]. با توجه به تفاوت اندک شدت نور در محل فواره و در زمینه عکس های حاصل از این روش، تحلیل درست عکس ها برای محاسبه دقیق خصوصیات کلان^۱ فواره نظیر عمق نفوذ، سرعت لبه و زاویه فواره بسیار مهم است. تاکنون از روش های مختلفی برای تحلیل عکس های فواره سوخت برای دستیابی به خصوصیات کلان انجام شده است. ساده ترین روش، تفکیک محل فواره از زمینه با استفاده از یک حد آستانه است. در این روش که بیشتر برای تحلیل عکس های استفاده می شود که اختلاف زیادی بین شدت زمینه و محل فواره وجود دارد، یک حد آستانه شدت، که معمولاً میانگین شدت عکس زمینه بدون فواره است تعریف می شود و مربع هایی که شدت نور در آن ها بزرگتر از حد آستانه است، برای حالتی که میانگین شدت نور زمینه کمتر از میانگین شدت نور فواره است، برابر یک (سفید) و بقیه مربع ها برابر صفر (سیاه) قرار می گیرند و در نتیجه یک تصویر دودویی حاصل می شود که در آن فواره به رنگ سفید و زمینه به رنگ سیاه است [۳].

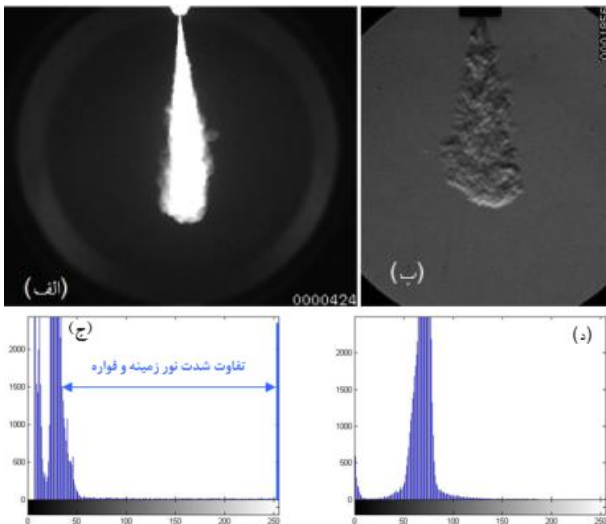
روش های دیگر، روش هایی اند مبتنی بر یافتن لبه های فواره. از بین این روش ها روش Canny برای عکس های شیلرین می تواند استفاده شود [۴].

روش شیلرین را برای تعیین ویژگی های فواره گذرای گاز محققان قبلی استفاده کرده اند [۵-۸] ولی تاکنون روش جامعی که در آن تأثیر متغیرهای مختلف تأثیر گذار روی دقت نتایج پردازش تصویر مطالعه شده باشد، ارائه نشده است. تحلیل حساسیت روی نتایج عکس های فواره مایع را که از روش عکسبرداری مستقیم به دست آمده اند دوک و همکاران [۹-۱۰] انجام داده اند ولی به دلیل تفاوت توزیع شدت نور عکس های شیلرین گاز و این عکس ها نمی توان نتایج آن را استفاده کرد.

² Blur

³ Noise

¹ Macroscopic



شکل ۲: عکس‌های متعلق به (الف) فواره دیزل [۱۵] و (ب) فواره تزریق مستقیم گاز هلیوم و عکس‌های زماندار متناظر با هر یک (محور افقی شدت نور و محور عمودی تعداد تکرار آن شدت در عکس است.)، (ج) متعلق به عکس فواره دیزل و (د) متعلق به عکس فواره تزریق مستقیم گاز هلیوم

با توجه به آنچه قبلاً گفته شد در این تحقیق از روش لبه یابی Canny برای پردازش عکس‌های شیلرین استفاده شد. در این روش، مشتق تابع گوس به عکس اعمال می‌شود (معادله ۲) و نقاط بیشینه محلی حاصل شده، با توجه به حد آستانه‌ای^۴ که تعریف می‌شود، به عنوان لبه در نظر گرفته می‌شوند. اصول عملکرد این روش بدین شکل است که تابع گوس دوبعدی به صورت معادله ۱ در نظر گرفته می‌شود [۴]:

$$G = \text{Exp}\left(-\frac{x^2 + y^2}{2\sigma^2}\right) \quad (1)$$

که در آن x و y مختصات و σ عدد ثابت تعیین کننده شکل تابع گوس است. نقاط بیشینه محلی از حل معادله ۲ حاصل می‌شوند:

$$\frac{\partial}{\partial n} G_n * I = 0 \quad (2)$$

که در آن $*$ علامت ضرب کانولوشن^۵، I جدول شدت نور عکس در مربع‌های مختلف، G_n مشتق تابع گوس در راستای n و n راستای عمود بر لبه است. نمونه عکس‌های فواره که با حد آستانه‌های مختلف (tr) به این روش لبه یابی (Canny) دودویی شده‌اند، در شکل ۳ نشان داده شده‌اند.

در آزمون‌ها از گاز هلیوم به عنوان گاز تزریق استفاده شد. عکسبرداری با استفاده از دوربین سریع Shimadzu Hyper Vision HPV-1 انجام شد. این دوربین قابلیت عکسبرداری را تا سرعت ۱ میلیون عکس بر ثانیه دارد. قدرت تفکیک عکس‌ها در همه سرعت‌های عکسبرداری برابر 312×260 مربع می‌باشد [۱۴].

۳ پردازش تصاویر

پس از عکسبرداری از تزریق هلیوم به تعداد ۱۵۰ بار تکرار آزمون، عکس‌های حاصل از دوربین برای پردازش بعدی به حافظه رایانه منتقل شد. در اینجا لازم است تأکید شود، هر آزمون ۱۵۰ بار تکرار شد یعنی هر بار ۱۵۰ تزریق مختلف انجام گرفت و از هر تزریق، تعداد ۱۰۰ عکس از شکل‌گیری فواره گاز در حافظه رایانه ذخیره شد که از این ۱۰۰ عکس با توجه به شرایط آزمون (نسبت فشار و محدوده عکسبرداری) تعدادی عکس به دلیل خارج رفتن فواره از محدوده عکسبرداری قابل تحلیل برای محاسبه عمق نفوذ نبودند. پیش از تحلیل، میانگین شدت عکس زمینه (بدون وجود فواره در آن) از تک تک عکس‌های فواره در زمان‌های مختلف تفریق شدند. این عمل که به آن تفریق عکس زمینه^۱ گفته می‌شود، باعث می‌شود اجزای ثابت تصاویر مانند ذرات غبار روی آینه‌ها، عدسی یا حسگر دوربین که در همه عکس‌ها وجود دارند، حذف شوند و عکس باقیمانده تنها حاوی فواره و هوای اطراف آن باشد. در مقایسه با عکس‌های به دست آمده از روش عکسبرداری مستقیم^۲ که برای فواره‌های سوخت مایع استفاده می‌شوند، تفاوت بین شدت نور زمینه عکس‌های شیلرین با شدت نور محل فواره بسیار ضعیف است و همین امر پردازش عکس‌های شیلرین را سخت می‌کند.

برای عکس‌های فواره سوخت مایع، چون تفاوت بین شدت نور زمینه و فواره در عکس زیاد است، می‌توان از روش‌های مختلفی برای محاسبه خصوصیات این گونه فواره‌ها استفاده نمود. برای مقایسه خصوصیات عکس‌های فواره‌های مایع و گاز، عکس‌های فواره سوخت دیزل (از روش عکسبرداری مستقیم) و عکس‌های فواره گاز (از روش شیلرین) در شکل ۲ نشان داده شده است. نمودار نشان داده شده در شکل، نمودار آماری شدت نور^۳ است که در واقع نوعی توزیع آماری شدت نور را در مربع‌های مختلف نشان می‌دهد.

¹ Background subtraction

² Volume Illumination

³ Histogram

⁴ Threshold

⁵ Convolution

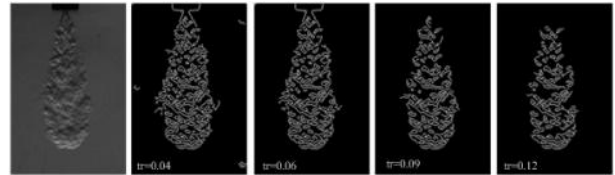
۴- با توجه به اینکه عکس شروع و پایان تزریق برای همه ۱۵۰ مجموعه^۱ تکرار شده یکسان نیست در زمان تحلیل ۱۰۰ عکس هر مجموعه (تعداد عکس‌های مفید قابل تحلیل هر مجموعه می‌تواند از ۱۰۰ عکس کمتر باشند چون تعدادی از عکس‌های ابتدایی، ممکن است حاوی فواره نباشند و تعدادی از عکس‌های انتهایی که در آن‌ها فواره از محدوده تصویربرداری خارج می‌شود، بدون استفاده می‌باشند). شایان ذکر است که عکس شروع تزریق به عنوان مبدأ زمانی آن مجموعه در نظر گرفته می‌شود.

۵- برای یافتن عمق نفوذ، تصویر دودویی ایجاد شده، از انتهای تصویر که شدت نور صفر است بررسی شد تا به نقطه ای که شدت نور ۱ (در عکس دودویی) دارد، برسد. این نقطه به عنوان نقطه پیش‌تاز فواره در نظر گرفته شد و فاصله آن از نوک دماغه به عنوان عمق نفوذ محوری تعریف شد. برای افزایش تک سوراخ و به منظور مقایسه نتایج با روش تحلیلی، نقطه پیش‌رو در راستای محور سوراخ افزاشه به عنوان مبنای اندازه‌گیری عمق نفوذ قرار گرفت. برای یافتن سرعت لبه در زمان t_i نیز از معادله $u = \frac{S_i - S_{i-1}}{\Delta t}$ و S_{i-1} و S_i عمق نفوذ در دو زمان t_i و t_{i-1} و Δt فاصله زمانی بین دو عکس است) استفاده شد.

۶- پس از این عملیات برای عکس‌های صد و پنجاه آزمون تکراری، مقادیر میانگین، انحراف معیار و عدم قطعیت‌ها محاسبه شدند.

۴) تحلیل حساسیت به حد آستانه

گفته شد که تعیین حد آستانه مناسب برای دستیابی به نتایج دقیق و تحلیل عکس‌های شیلرین بسیار مهم است. بنابراین چون نتایج تجربی فقط در صورتی اعتبار و دقت دارند که به روش درستی تحلیل شوند، در این بخش روشی برای تعیین حد آستانه مناسب عکس‌های شیلرین ارائه می‌شود. در شکل ۴ اثر تغییر حد آستانه روش لبه‌یابی روی نتایج میانگین عمق نفوذ نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل مشخص است، میانگین عمق نفوذ محوری فواره در محدوده حد آستانه ۰,۰۸-۰,۱۱ مستقل از حد آستانه است (روی هم افتادگی نشانه‌های شکل باعث می‌شود که مثلاً برای مقادیر عمق نفوذ، فقط یکی از آن‌ها (threshold = 0.08) معلوم باشد). این مقادیر حدی به روش آزمون و خطا به دست آمده‌اند و برای مقادیر حد آستانه بیشتر از ۰,۱۱ نقاط کمتری داخل فواره به عنوان لبه شناخته می‌شوند که ممکن است باعث از دست رفتن مرزهای فواره شود و حاصل آن کاهش عمق نفوذ محوری یا شعاعی فواره می‌شود. حداکثر حد آستانه در شکل ۴ مقداری است که بالاتر از آن، حداقل در عکس وابسته به یک زمان مشخص، عمق نفوذ، اختلاف زیادی با



شکل ۳: تأثیر حد آستانه روش لبه‌یابی، روی عکس دودویی حاصل از یک نمونه عکس شیلرین فواره (tr حد آستانه در هر عکس مشخص است)

با توجه به شکل ۳، مشخص است که افزایش حد آستانه در روش لبه‌یابی Canny باعث می‌شود برخی از قسمت‌های فواره به عنوان لبه شناسایی نشوند و نتوان خصوصیات هندسی را بدرستی از آن استخراج نمود، از طرف دیگر با کوچکتر شدن حد آستانه ناهنجاری‌های عکس در نقاط مختلف به عنوان لبه شناسایی می‌شوند که این امر فرآیند لبه‌یابی را سخت می‌کند. مخصوصاً وقتی تعداد زیادی عکس تحلیل می‌شوند. بنابراین چالش مهم در روش Canny انتخاب حد آستانه مناسب است. در این مقاله روشی بر مبنای نظام اوتسو استفاده شد تا بتوان از آن برای محاسبه حد آستانه مناسب استفاده نمود [۱۷-۱۶]. یافتن حد آستانه مناسب در این روش بر این اصل استوار است که تصویر از دو بخش زمینه و فواره تشکیل شده است و بهترین حد آستانه، آن است که این دو بخش را از هم جدا کند. برای هر آستانه tr ، گروهی از شدت مربع‌ها (i) اند که $i > tr$ و گروهی هم $i < tr$ روش اوتسو، حداقل مجموع وزنی انحراف معیار این دو گروه را می‌دهد. حد آستانه پیشنهادی این روش وقتی σ_w^2 حداقل می‌شود (معادله ۳)، به دست می‌آید [۱۶]:

$$\sigma_w^2(tr) = q_1(tr)\sigma_1^2(tr) + q_2(tr)\sigma_2^2(tr) \quad (3)$$

که در آن q_1 و q_2 احتمال وقوع دو گروه شدت‌های بزرگتر و کوچکتر از tr در عکس می‌باشند و $\sigma_1^2(tr)$ و $\sigma_2^2(tr)$ توان دوم انحراف معیارهای دو گروه یاد شده اند.

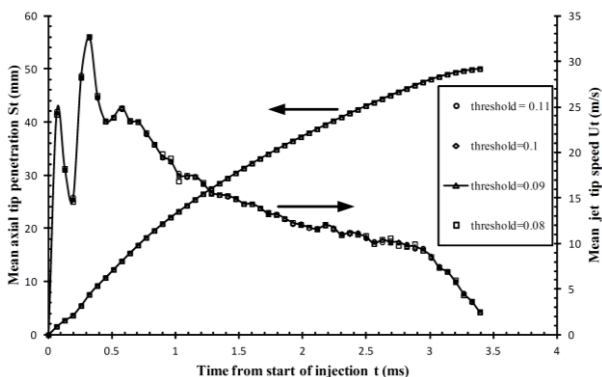
در این مقاله، تحلیل تصاویر با استفاده از برنامه نویسی در نرم افزار MATLAB انجام گرفت و نرم افزاری ایجاد شد که در آن حد آستانه هر عکس بر اساس روش اوتسو تعیین می‌شود و با استفاده از حد آستانه به دست آمده و روش Canny، لبه‌های فواره شناسایی می‌شود و عمق نفوذ، سرعت لبه و زاویه فواره از آن استخراج می‌شود. مراحل اجرای کار بدین شکل بود:

۱- تفریق میانگین شدت نور عکس زمینه بدون فواره (I_{bg}) از عکس زمینه حاوی فواره (I) برای حذف ناهنجاری‌های ثابت در تصاویر مانند ذرات گرد و غبار روی اجزای سامانه نوری (حسگر دوربین، آیینه ها و عدسی) و حذف ناهنجاری‌های احتمالی حسگر دوربین که در عکس‌ها ظاهر می‌شوند.

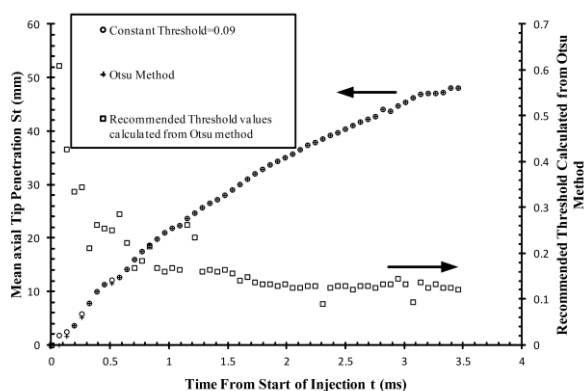
۲- یافتن حد آستانه هر عکس با استفاده از روش اوتسو

۳- لبه‌یابی عکس حاصل و تبدیل آن به عکس دودویی (I_b)

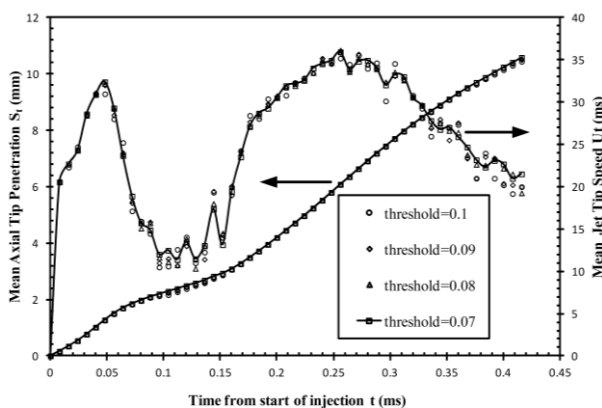
^۱ هر تزریق در آزمون‌ها ۱۵۰ بار تکرار شد و در اینجا منظور از "مجموعه" تمامی عکس‌های به دست آمده از عکسبرداری یک تزریق فواره گذرای گاز است که حداکثر ۱۰۰ است.



شکل ۴: تغییرات میانگین عمق نفوذ و میانگین سرعت لبه فواره بر حسب زمان بعد از شروع تزریق در افشانه ۷ سوراخ و بررسی اثر تغییر حد آستانه روش لبه یابی (نسبت فشار ۳ و ناحیه دور دماغه)



شکل ۵: مقایسه نتایج میانگین عمق نفوذ به دست آمده از حد آستانه ثابت و متغیر (روش اوتسو) و حد آستانه محاسبه شده پیشنهادی روش اوتسو برای افشانه هفت سوراخ، نسبت فشار ۳ و ناحیه دور دماغه



شکل ۶: تغییرات عمق نفوذ و سرعت پیشانی فواره در ناحیه نزدیک افشانه ۷ سوراخ با تغییر حد آستانه (برای نسبت فشار ۳)

در نزدیکی دماغه به دلیل این که اختلاط کمی در محدوده لبه فواره اتفاق می افتد، تغییر محسوس شدت نور در لبه فواره وجود دارد، در حالی که با افزایش عمق نفوذ و اختلاط گاز تزریق و گاز داخل محفظه آزمون در ناحیه لبه، شدت نور با شیب کمتری در لبه تغییر

عکس های زمان مشابه تکرارهای تزریق دیگر دارد. این حد آستانه با مشاهده عکس های فواره دودویی شده نیز براحتی قابل تشخیص است. از طرف دیگر با انتخاب حد آستانه کوچکتر از ۰,۰۸ در برخی مناطق عکس که این مناطق ممکن است در ناحیه زمینه تصویر (خارج از ناحیه فواره) باشند، نقاطی به صورت ناخواسته به عنوان لبه در نظر گرفته می شوند. وجود این لبه های ناخواسته در تصویر، فرآیند پردازش تصویر را سخت می کند و وقتی به عنوان مثال، برنامه نوشته شده می خواهد ۷۵۰۰ عکس را برای یک مجموعه تزریق با ۱۵۰ تکرار و متوسط ۵۰ عکس مفید تحلیل کند، وجود چنین ضعفی دستیابی به جواب های درست را عملاً غیرممکن می سازد.

تعیین این حدود برای موفقیت در پردازش تصویر ضرورت دارد ولی رسیدن به آن، فرآیند بسیار زمان بری است. با توجه به شکل ۴، بیشترین اختلاف بین نتایج از حد آستانه مرجع برای عمق نفوذ برابر ۱,۰۲ درصد (برای حد آستانه ۰,۰۸ و زمان $t = 0.064$ ms پس از شروع تزریق در شکل ۴) و برای سرعت لبه ۴,۴۹ درصد (برای حد آستانه ۰,۰۸ و زمان $t = 2.688$ ms پس از شروع تزریق در شکل ۴) است. مسأله دیگری که باید به آن توجه نمود، متفاوت بودن عکس های شیلرین یک مجموعه عکس از زمان $t = 0$ تا $t = t_{inj}$ است.

در عکسبرداری سریع جریان سیال، به دلیل ثابت نبودن شرایط نورپردازی و عدم قطعیت حسگر دوربین سریع، عکس های یک مجموعه، ممکن است متفاوت باشند و با توجه به افزایش تدریجی سطح مقطع ناحیه فواره با گذشت زمان از شروع تزریق، به نظر می رسد نیاز به حد آستانه پویا (حد آستانه متغیر با گذشت زمان) می باشد. روش اوتسو [۱۶] یکی از روش هایی است که بر مبنای مساحت ناحیه زمینه و ناحیه فواره برای هر عکس، حد آستانه معینی را ارائه می دهد. با توجه به حد آستانه متغیر پیشنهادی این روش با گذشت زمان، مقایسه نتایج عمق نفوذ حد آستانه ثابت و حد آستانه تعیین شده به این روش در شکل ۵ نشان داده شده است. همان طور که در این شکل مشخص شده است، نتایج روش اوتسو در بیشتر زمان ها دقیقاً همان نتایج روش حد آستانه ثابت می باشند. چون روش اوتسو بر مبنای اختلاف شدت نور نواحی زمینه و فواره عمل می کند و حد آستانه ای بزرگتر از مقدار مورد نیاز پیشنهاد می دهد در ابتدای شکل گیری فواره در عکس های ابتدایی (زمان ۰,۰۳- میلی ثانیه در شکل ۵) که ناحیه فواره درصد کمی از کل تصویر را به خود اختصاص می دهد، اختلاف کمی بین عمق نفوذ به دست آمده از این روش و عمق نفوذ به دست آمده از روش حد آستانه ثابت، مشاهده می شود.

نتایج بررسی حساسیت عمق نفوذ و سرعت لبه به حد آستانه برای ناحیه نزدیک دماغه افشانه چند سوراخ در شکل ۶ نشان داده شده اند.

مقاله مشاهده شد، مانند فواره‌های تزریق مستقیم بنزینی با بیشینه فشار ۲۰۰ اتمسفر و فواره‌های دیزل با بیشینه فشار پاشش ۲۰۰۰ اتمسفر نمی‌توان از دوربین کم سرعت (به عنوان نمونه دوربین با سرعت ۵۰۰۰ عکس بر ثانیه) استفاده نمود چون فواصل زمانی بین عکس‌های متوالی به اندازه کافی کوچک نیست.

۶) کمی سازی تأثیرات ناهنجاری و ماتی تصاویر

همان طور که گفته شد یکی از عواملی که بر دقت نتایج پردازش تصاویر فواره تأثیرگذار است، تنظیمات نور است. وجود ناهنجاری در تصاویر همچنین ماتی آنها باعث خطا در نتایج نهایی عمق نفوذ و سرعت لبه فواره می‌شود. چون در این تحقیق از روش لبه یابی استفاده شد، ماتی باعث می‌شود که گرادین شدت نور در راستای لبه فواره تغییر کند و لبه شناسایی شده، همان لبه واقعی نباشد. تاری لبه معمولاً در اثر تنظیم نادرست سامانه نور و ماهیت حرکت فواره اتفاق می‌افتد. تنظیم کردن درست سامانه نور خطای ماتی را کمینه می‌کند ولی آن را حذف نمی‌کند. چون ماتی نوری را می‌توان تقریباً به صورت توزیع گوسی در نظر گرفت، انحراف معیار کرنل گوسی (σ_b) به عنوان معیاری از مقدار ماتی در تصاویر تعریف می‌شود [۹].

$$G(x, y, \sigma_b) = \frac{1}{2\pi\sigma_b^2} \text{Exp}\left(-\frac{x^2 + y^2}{2\sigma_b^2}\right) \quad (۴)$$

این معادله در واقع بیانگر تأثیر ماتی بر توزیع شدت نور در لبه و خطای حاصل از آن است. مقدار σ_b در هنگامی که عکس در شرایط تنظیم نور^۲ گرفته شده باشد، در محدوده $0.5 < \sigma_b < 1$ قرار دارد و عدم تنظیم مناسب ممکن است مقدار آن را به ۵ نیز افزایش دهد. در شکل ۷ تصویری از فواره در حالت مرجع (در حالت تنظیم شده نور) بدون ماتی مصنوعی با تصویری که در آن‌ها در عکس مرجع، ماتی به طور مصنوعی وارد شده است، مقایسه شده است.

برای بررسی تأثیر ماتی بر نتایج عمق نفوذ و سرعت لبه حاصل از پردازش تصاویر، ماتی‌های مختلف با توزیع گوسی با انحراف معیارهای مختلف $\sigma_b = 1-4$ روی عکس مرجع با برنامه نرم افزار MATLAB وارد شد و خطای ایجاد شده در اثر این ماتی با اندازه گیری عمق نفوذ و سرعت لبه به ازای عکس‌های جدید و مقایسه آن با عکس‌های مرجع محاسبه شد. در عکسبرداری از فواره گاز دو نوع ماتی می‌تواند در نظر قرار بگیرد، یکی ماتی مطلق و دیگری ماتی نسبی. منظور از ماتی مطلق وجود ماتی به اندازه یکسان برای همه عکس‌هاست. ماتی نسبی در واقع به این شکل اتفاق می‌افتد که دو عکس متوالی ماتی یکسانی ندارند و ماتی آنها به اندازه σ_b با هم اختلاف دارد. معمولاً در عکسبرداری سریع شرایط عکسبرداری نسبت به زمان به دلایل مختلف از قبیل تغییر شدت منبع نور در حین

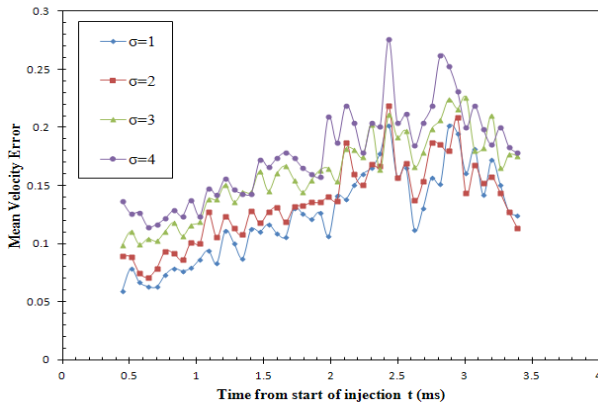
می‌کند، در نتیجه حساسیت نتایج به حد آستانه بیشتر می‌شود. برای سرعت پیشانی فواره این مسأله بیشتر از عمق نفوذ احساس می‌شود. بررسی نتایج همچنین نشان داد که حساسیت مقادیر عمق نفوذ و سرعت لبه به حد آستانه با کاهش سرعت لبه افزایش می‌یابد. با کندشدن سرعت لبه، فاصله‌ای که لبه فواره در مدت زمان مشخصی می‌پیماید کمتر می‌شود و این بدین معنی است که اختلاف جابه جایی لبه بین دو عکس متوالی تعداد مربع کمتری را در بر می‌گیرد و با توجه به محدودیت اندازه مربع، این امر باعث افزایش حساسیت به حد آستانه می‌شود. این مسأله برای نتایج ناحیه نزدیک دماغه شدیدتر است، چون در فواصل زمانی کوچک، فواره مسافت کمتری را بین دو عکس متوالی می‌پیماید. در واقع جابه جایی بین عکس‌های متوالی فواره با سرعت فواره سنجیده می‌شود. با وجود این حساسیت، تأثیر حد آستانه (البته در محدوده مجاز) روی نتایج محاسبه شده عمق نفوذ و سرعت بسیار کم است. همان طور که در شکل ۶ نشان داده شده است برای کمینه سرعت تقریباً 11 m/s ، بیشینه اختلاف حدود $14 \pm$ درصد و برای بیشینه سرعت 35 m/s کمتر از $2 \pm$ درصد است. نتایج مشابهی هم برای نسبت‌های فشار دیگر و هم برای افشانه تک سوراخ مشاهده می‌شود.

۵) تأثیر ضریب مقیاس

ضریب مقیاس در واقع تعداد اندازه هر مربع در واحد طول است. سرعت عکسبرداری و ضریب مقیاس دو عامل تعیین کننده در دقت اندازه‌گیری سرعت لبه فواره اند. با افزایش همزمان سرعت عکسبرداری و کاهش ضریب مقیاس عکس‌ها، دقت اندازه‌گیری سرعت لبه افزایش می‌یابد. از طرفی چون روش‌های لبه‌یابی ممکن است تا چند مربع خطا داشته باشند، برای اندازه‌گیری سرعت لبه لازم است نسبت ضریب مقیاس به فاصله زمانی بین دو عکس متوالی به عنوان معیاری از این خطا محاسبه شود تا خطای سرعت لبه در صورت خطای یک مربع در روش لبه‌یابی برای یافتن لبه به دست آید. این خطا نباید به نسبت سرعت لبه محاسبه شده خیلی زیاد باشد تا نتایج به دست آمده قابل اعتماد باشند. به عبارت دیگر عکسبرداری بسیار سریع همیشه مناسب نیست و انتخاب آن به سرعت لبه بستگی دارد. در فواره‌ای که با سرعت کم حرکت می‌کند، چون لبه بین دو عکس متوالی تعداد مربع کمی را می‌پیماید، استفاده از عکسبرداری بسیار سریع و ضریب مقیاس بزرگ باعث می‌شود پدیده گیر افتادگی در مربع‌ها رخ دهد و فواره بین دو عکس متوالی کمتر از یک مربع طی کند و این امر به خطای اندازه‌گیری سرعت می‌افزاید. استفاده از دوربین سریع‌تر این قابلیت را فراهم می‌کند که اولاً از اتفاقاتی که در ابتدای شکل‌گیری فواره می‌افتد بتوان اطلاعات کاملتری کسب نمود. از طرفی برای اندازه‌گیری سرعت فواره‌های سریع‌تر از آنچه در این

² Focused

¹ Pixel locking



شکل ۹: میانگین خطای سرعت لبه فواره، حاصل از ماتی با درجه‌های مختلف بر حسب زمان

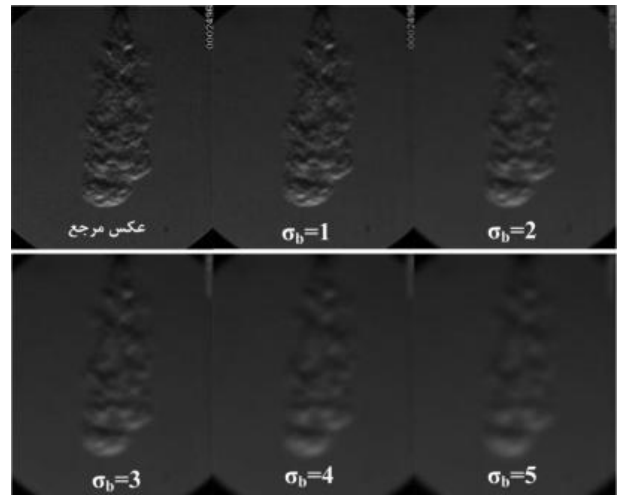
برای سرعت لبه این روند برعکس است، چون با گذشت زمان سرعت لبه کاهش می‌یابد (شکل ۴) و این کاهش سرعت باعث می‌شود تعداد مربعی که لبه فواره بین دو عکس متوالی طی می‌کند کمتر شود و در نتیجه خطای ماتی در این حالت درصد بیشتری از سرعت لبه را به خود اختصاص دهد. عامل دیگری که بر دقت نتایج پردازش تصاویر تأثیر می‌گذارد ناهنجاری در تصاویر است. ناهنجاری در تصاویر از حسگر CCD دوربین سریع ناشی می‌شود و ممکن است منابع متعددی داشته باشد [۱۰]. ناهنجاری در زمان ثبت عکس^۱ در اثر برخورد تصادفی فوتون‌ها به حسگر دوربین ایجاد می‌شود و مهمترین منبع ایجاد ناهنجاری است. توزیع ناهنجاری را هم می‌توان در عکس‌ها به صورت گوسی در نظر گرفت. چون روش لبه‌یابی به ناهنجاری بسیار حساس است و بر خلاف ماتی تأثیر آن به صورت تصادفی در عکس‌ها ظهور می‌کند، وجود ناهنجاری در عکس‌ها باعث ایجاد خطای فاحش در پردازش تصاویر می‌شود. نتایج اعمال ناهنجاری مصنوعی به عکس‌های فواره نشان دادند که عکس‌های شیلرین با ناهنجاری بیش از ۰.۵ قابل تحلیل نیستند چون تعداد لبه‌های ناخواسته در عکس‌ها آنقدر زیاد می‌شود که پردازش تصاویر را غیر ممکن می‌کند.

۷ نتیجه‌گیری

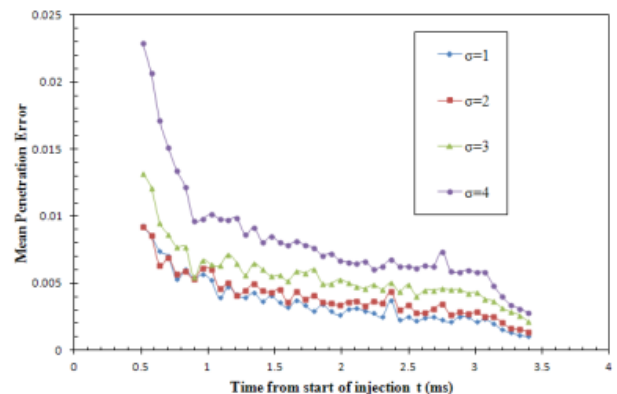
در این مقاله تحلیل حساسیت اثر متغیرهای: حد آستانه روش لبه‌یابی، ضریب مقیاس و درجه ماتی و ناهنجاری موجود در تصاویر شیلرین فواره تزریق مستقیم گاز بر نتایج پردازش تصویر مطالعه شد. مقادیر عمق نفوذ و سرعت لبه فواره برای حد آستانه‌های مختلف و درجه‌های مختلف ماتی تصاویر که به صورت مصنوعی در عکس‌های فواره اعمال شده بودند محاسبه شدند. نتایج نشان دادند که حساسیت نتایج پردازش تصویر لبه‌یابی به حد آستانه‌ای که لبه فواره را از زمینه تصویر فواره جدا می‌کند (در محدوده مجاز حد آستانه)

عکسبرداری، ثابت نبودن رفتار حسگر دوربین بر حسب زمان و تأثیر نفوذ خود فواره بر ماتی، ثابت نیست بنابراین در عکسبرداری معمولاً ماتی نسبی وجود دارد. بنابراین در این جا، این نوع ماتی مطالعه و کمی شده است. تغییر عمق نفوذ و سرعت لبه در اثر وجود ماتی نسبی در تصاویر در شکل‌های ۸ و ۹ نشان داده شده است.

شکل‌های ۸ و ۹ نشان می‌دهند که حساسیت عمق نفوذ فواره به مقدار ماتی کمتر از سرعت لبه است و حداکثر ۲٪ خطا ممکن است در بیشترین ماتی اتفاق بیفتد ولی شکل ۹ نشان می‌دهد که سرعت لبه ممکن است در بیشترین ماتی تا ۲۸٪ خطا در نتایج سرعت لبه ایجاد کند. با گذشت زمان در نمودار عمق نفوذ چون عمق نفوذ افزایش می‌یابد و مقدار خطا تقریباً ثابت است، خطای نسبی نشان داده شده در شکل ۸ که حاصل نسبت میانگین خطا به عمق نفوذ حالت مرجع ($\sigma_b = 0$) است، کاهش می‌یابد.



شکل ۷: تصاویر فواره تزریق مستقیم گاز برای عکس مرجع و عکس‌هایی با درجه ماتی متفاوت



شکل ۸: میانگین خطای عمق نفوذ فواره، حاصل از ماتی با درجه‌های مختلف بر حسب زمان

¹ Shot noise

References

- [1] H. Zhao, Laser diagnostics and optical measurement techniques in internal combustion engines, SAE International, 2012
- [2] G. S. Settles, Schlieren and shadowgraph techniques: Visualizing phenomena in transparent media, Springer, Germany, 2001
- [3] J. Shao, Y. Yan, Digital imaging based measurement of diesel spray characteristics, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Vol. 57, No. 9, pp. 2067-2073, 2008
- [4] J. Canny, A computational approach to edge detection, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 8, pp. 679-98, 1986
- [5] 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
- [6] B. Petersen, Transient high-pressure hydrogen jet measurements, MSc Thesis, University of Wisconsin-Madison, USA, 2006
- [7] E.C. Chan, R.L. Evan, M.H. Davy, S. Cordiner, Pre-ignition characterization of partially-stratified natural gas injection, JSAE, Paper No. 20077252, 2007
- [8] M. Baratta, A.E. Catania, E. Spessa, L. Herrmann, K. Roessler, Multi-dimensional modeling of direct natural-gas injection and mixture formation in a stratified-charge SI engine with centrally mounted injector, SAE International, Paper No. 2008-01-0975, 2008
- [9] D. Duk, D. Honnery, J. Soria, A cross-correlation velocimetry technique for breakup of an annular liquid shee, Experimental Fluids, Vol. 49, pp. 435-445, 2010
- [10] D. Duke, D. Honnery, J. Soria, A comparison of subpixel edge detection and correlation algorithms for the measurement of spray, International Journal of Spray and Combustion Dynamics, Vol. 3, No. 2, pp. 93-109, 2011
- [11] 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
- [12] 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
- [13] A. Hajjalimohammadi, D. Honnery, A. Abdullah, S.M. Mirsalim, Time resolved characteristics of gaseous jet injected by a group-hole nozzle, Fuel, Vol. 113, pp. 497-505, 2013
- [14] T.G. Etoh, An image sensor which captures 100 consecutive frames at 1000000 frames/s, IEEE Transactions on Electron Devices, Vol. 50, No. 1, pp. 144-151, 2003

بسیار کم است و این حساسیت در مناطقی که سرعت لبه کمتر است، بیشتر می‌شود. نتایج همچنین نشان داد حساسیت عمق نفوذ فواره به مقدار ماتی (با توزیع گوسی) کمتر از سرعت لبه است و حداکثر ۲٪ خطا ممکن است در بیشترین ماتی اتفاق بیفتد ولی در بیشترین ماتی تا ۲۸٪ خطا در نتایج سرعت لبه ایجاد می‌شود. اعمال ناهنجاری مصنوعی به عکس‌های فواره نشان دادند که عکس‌های شیلرین با ناهنجاری بیش از ۰.۵ قابل تحلیل نیستند چون تعداد لبه‌های ناخواسته در عکس‌ها آنقدر زیاد می‌شود که پردازش تصاویر را غیر ممکن می‌کند. در این مقاله همچنین روش اوتسو که به صورت دینامیکی حد آستانه‌ای را با توجه به خصوصیات هر عکس ارائه می‌دهد پیشنهاد شد و نتایج تحلیل تصاویر با این روش نشان داد، در صورتی که برای پردازش تصویر عکس‌های شیلرین فواره گاز، به دلیل محدودیت‌هایی که این عکس‌ها برای پردازش تصویر دارند، از حد آستانه متغیر (روش اوتسو) استفاده شود، زمان و هزینه محاسبات بشدت کاهش می‌یابد و این روش کارایی خوبی در تعیین حد آستانه‌ی روش لبه‌یابی دارد.

تشکر و قدردانی

نویسندگان این مقاله، از همکاری صمیمانه تمام اعضای آزمایشگاه LTRAC دانشکده مکانیک دانشگاه موناخ مخصوصاً آقایان دکتر دانیل میچل و دکتر دانیل دوک کمال تشکر را دارند. ضمناً از مرکز تحقیقات موتور ایران خودرو و دانشگاه موناخ به خاطر حمایت مالی اجرای این تحقیق قدردانی می‌نمایند.

فهرست علائم

I	شدت نور، -
s	عمق نفوذ، m
u	سرعت لبه، m/s
t	زمان، sec
tr	حد آستانه، -
x	مختصات مکان، m
y	مختصات مکان، m

علائم یونانی

σ	انحراف معیار، -
----------	-----------------

زیرنویس‌ها

b	دودویی
bg	زمینه
t	لبه
inj	توزیع

[17] J.I. Ghojel, X.T. Tran, Ignition characteristics of diesel-water emulsion sprays in a constant - volume vessel: Effect of injection pressure and water content, *Energy Fuels*, Vol. 24, pp. 3860-3866, 2010

[15] J. Kostas, D. Honnery, J. Soria, A correlation image velocimetry-based study of high-pressure fuel spray tip evolution, *Experimental Fluids*, Vol. 51, pp. 667-678, 2011

[16] N. Otsu, A threshold selection method from gray-level histograms, *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, Vol. 9, pp. 62-66, 1979



The Journal of Engine Research

Journal Homepage: www.engineersearch.ir



Sensitivity analysis of parameters affecting image processing of high pressure gaseous jet images

A. Hajjalimohammadi^{1*}, D. Honnery², A. Abdullah³, S.M. Mirsalim⁴

¹Irankhodro Powertrain Company (IPCO), Tehran, Iran, a_hajjali@ip-co.com

²Mechanical Engineering Department, Monash University, Melbourne, Australia, damon.honnery@monash.edu

³Mechanical Engineering Department, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran, amirah@aut.ac.ir

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

*Corresponding Author, Phone Number: +98-912-455-1264

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 18 February 2014

Accepted: 16 March 2014

Keywords:

Image processing

Gaseous jet

Edge finding

Otsu

Canny

ABSTRACT

Digital image processing is one of efficient methods that is adopted today for the determination of fuel spray characteristics in internal combustion engines. The imaging method and the images quality are two important factors that influence the accuracy of results. In this paper, an edge finding method was employed for processing of the Schlieren image of the gaseous jet, and sensitivity analysis has been conducted to investigate effects of the edge finding method threshold, the experiments scale factor and the level of the blur and the noise of images on image processing results. A method based on the Otsu method has been proposed also for finding the dynamic threshold for Schlieren jet images. Results showed that the sensitivity of the jet tip velocity to the edge finding method threshold was low (in the valid range of the threshold), but in regions that the jet tip velocity was low, this sensitivity was as high as 14%. The sensitivity of the jet tip penetration to the blur level of images was less than 2%, while the tip velocity was more sensitive to the blur content of images, and the blur with the standard deviation of 4 could led to 28% error in the tip velocity.

© Iranian Society of Engine (ISE), all rights reserved.